



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

رسالة محاضرة لنيل شهادة

دكتوراه LMD

تخصص: فيزياء اشعاع، مادة وطاقة

من اعداد:

خلافه خوله

تحت عنوان:



رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

**المساهمة في دراسة ظواهر النقل في خلية وقود من
نوع غشاء التبادل البروتوني (PEMFC)**

نوقشت يوم 2024/12/1 أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة :

| | | | |
|------------|---------------|------------------|-----------------|
| رئيسا | جامعة الوادي | أستاذ تعليم عالي | بقاص عز الدين |
| مشرفا | جامعة باتنة 2 | أستاذ تعليم عالي | بن موسى حسين |
| مشرف مساعد | جامعة الوادي | أستاذ تعليم عالي | عطية عبد المالك |
| ممتحنا | جامعة باتنة 2 | أستاذ تعليم عالي | دماغ ياسين |
| ممتحنا | جامعة الوادي | أستاذ تعليم عالي | بن حوه بوبكر |
| ممتحنا | جامعة الوادي | أستاذ محاضر-أ- | ليتييم فتحي |

الموسم الجامعي: 2024/2023

الإهداء

إلى من عطرت صفحات الماضي بأنغام الحياة إلى روحها الطاهرة

أمي

إلى رمز التضحية والفداء الذي علمني معنى الصبر على الشدائد

أبي

إلى قلبي وبصري حفظهم الله ورعاهم

أولادي

إلى من أعانوني بعقلهم وقلوبهم سندي وعضدي

زوجي واخوتي

إلى رفاق الدرب والقلم في ساحات العلم والمعرفة

زملائي

إلى الذين قادوا تماسكي إلى البر

أهلي

أزرف إليكم جميع أسمى عبارات التقدير والاحترام

خلايفه خوله

شكر وعرّفان

أولاً وقبل كل شيء، أود أن أشكر الله عز وجل على هدايته وعونه في إكمال هذه الأطروحة.

أتقدم بخالص الشكر والامتنان لمشرفي على الأطروحة، الأستاذ الدكتور بن موسى الحسين من جامعة باتنة، على مساعدته وثقته ونصائحه الحكيمة ودعمه المستمر خلال السنوات الماضية. أود أن أعبر له عن عميق امتناني وتقديري.

كما أتقدم بأسمى عبارات الشكر للأستاذ الدكتور عبد المالك عطية، المشرف المساعد في رسالتي، الأستاذ بجامعة حمه لخضر بالوادي. أشكره جزيل الشكر على صبره وتشجيعه الذي دعمني وأعانتني بعد الله خلال الأوقات الصعبة، وعلى رؤيته واقتراحاته التي ساعدت في تشكيل مهاراتي البحثية.

أوجه شكري الخالص للأستاذ الدكتور بقاص عز الدين من جامعة الوادي الذي شرفني برئاسة هذه اللجنة. وأود أن أشكر جميع أعضاء اللجنة على قبولهم تقييم هذا العمل، وهم الأساتذة الدكتور بن حوه بوبكر من جامعة الوادي والدكتور دماغ ياسين من جامعة باتنة، والأستاذ الدكتور ليتيم فتحي من جامعة الوادي.

علاوة على ذلك، فإنني مدينة بالشكر الجزيل للأستاذ القدير بوبكر بن حوه والأستاذ الفاضل زبير بسر على توجيهاتهم القيمة واقتراحاتهم في الوقت المناسب والدعم المعنوي والتشجيع الذي قدماه أثناء مسيرتي العلمية.

خلايفه خوله

فهرس

شكر و عرفان

الإهداء

| | |
|------|---------------|
| I | فهرس |
| IV | قائمة الأشكال |
| VII | قائمة الجداول |
| VIII | قائمة الرموز |
| 1 | مقدمة عامة |

الفصل الأول

أساسيات خلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC

| | | |
|----|-----------|---|
| 5 | 1.1 | مقدمة |
| 5 | 2.1 | تكنولوجيا خلايا الوقود |
| 5 | 1.2.1 | تاريخ تقنية الخلايا الوقودية |
| 7 | 2.2.1 | خصائص الخلايا الوقودية |
| 8 | 3.2.1 | أنواع الخلايا الوقودية ومجالات تطبيقاتها |
| 9 | 3.1 | خلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC |
| 10 | 1.3.1 | وصف بنية PEMFC |
| 11 | 1.1.3.1 | الغشاء (Membrane) |
| 12 | 2.1.3.1 | طبقة المحفز (Catalyst Layer) |
| 13 | 3.1.3.1 | طبقة انتشار الغاز (Gas Diffusion Layer) |
| 14 | 4.1.3.1 | الصفائح ثنائية القطب (Bipolar Plate) |
| 16 | 2.3.1 | مبدأ عمل PEMFC |
| 17 | 4.1 | أداء PEMFC |
| 17 | 1.4.1 | التيار الكهربائي الناتج |
| 17 | 2.4.1 | الجهد الكهربائي الناتج |
| 17 | 1.2.4.1 | جهد الدارة المفتوحة (الجهد النظري) |
| 20 | 1.2.2.4.1 | الاستقطاب الناتج عن التنشيط (activation loss) |
| 20 | 2.2.2.4.1 | الاستقطاب الناتج عن المقاومة الأومية (ohmic loss) |
| 20 | 3.2.2.4.1 | الاستقطاب الناتج عن التركيز (concentration loss) |
| 21 | 3.2.4.1 | الجهد الفعلي (الصافي) |
| 21 | 3.4.1 | استطاعة خلية الوقود (Power) |
| 21 | 4.4.1 | كفاءة الخلية (Efficiency) |
| 22 | 5.1 | مصادر الحرارة في PEMFC |

| | | |
|----|--|-------|
| 22 | أنتروبي التفاعلات النصفية (تأثير بالتر Peltier effect) | 1.5.I |
| 22 | التنشيط الكهروكيميائي للمتفاعلات | 2.5.I |
| 23 | حرارة امتصاص/امتزاز الماء (sorption/desorption) | 3.5.I |
| 23 | حرارة تغير الطور للماء | 4.5.I |
| 23 | تأثير جول (Joule effect) | 5.5.I |
| 24 | خلاصة | 6.I |

الفصل الثاني

دراسة مرجعية حول تبريد خلية PEMFC

| | | |
|----|---|----------|
| 26 | مقدمة | 1.II |
| 26 | تأثير درجة الحرارة على أداء PEMFC | 2.II |
| 27 | نظام التبريد | 3.II |
| 28 | التبريد بتدفق هواء الكاتود | 1.3.II |
| 28 | التبريد بتدفق هواء منفصل | 2.3.II |
| 29 | التبريد بتدفق سائل مبرد | 2.3.II |
| 29 | التبريد بالتبخير (التبريد مع تغيير الطور) | 2.3.II |
| 29 | التبريد باستخدام موزعات الحرارة | 2.3.II |
| 31 | تقنية التبريد بالسائل | 3.II |
| 33 | تصميم قناة التبريد | 1.3.II |
| 40 | التبريد بالمائع النانوي (NanoFluid) | 2.3.II |
| 40 | خصائص المائع النانوي | 1.2.3.II |
| 41 | مزايا المائع النانوي | 2.2.3.II |
| 41 | تطبيق المائع النانوي في PEMFC | 3.2.3.II |
| 43 | خلاصة | 4.II |

الفصل الثالث

محاكاة العمل باستخدام ديناميكا الموائع الحاسوبية (CFD)

| | | |
|----|--|---------|
| 45 | مقدمة | 1.III |
| 45 | أساسيات CFD | 2.III |
| 46 | البناء الهندسي | 1.2.III |
| 46 | إنشاء الشبكة | 2.2.III |
| 46 | تطبيق الخواص الفيزيائية والشروط الحدية | 3.2.III |
| 46 | الحل العددي | 4.2.III |
| 47 | المعالجة اللاحقة | 5.2.III |
| 47 | تنفيذ العمل في برنامج "Ansys Fluent" | 3.III |
| 49 | الوصف الهندسي للنموذج | 1.3.III |

| | |
|----|---|
| 50 | توليد الشبكة. 2.3.III |
| 52 | افتراضات النموذج الفيزيائي. 3.3.III |
| 52 | النمذجة الرياضية والشروط الحدية. 4.3.III |
| 53 | المعادلات الحاكمة. 1.4.3.III |
| 53 | الشروط الحدية. 2.4.3.III |
| 57 | الإجراءات العددي. 5.3.III |
| 57 | معالجة اقتران الضغط والسرعة. 1.5.3.III |
| 57 | مخطط التقدير. 2.5.3.III |
| 57 | معيار التفارب. 3.5.3.III |
| 58 | اختبار استقلال الشبكة (Grid Independence Test). 4.5.3.III |
| 60 | التحقق من صحة النموذج (Model Validation). 4.III |
| 61 | خلاصة. 5.III |

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

| | |
|----|--|
| 63 | مقدمة. 1.IV |
| 63 | دراسة التصميمات الأحادية (One Stage). 2.IV |
| 63 | تأثير التصميم الهندسي على معامل الحمل الحراري. 1.2.IV |
| 64 | تأثير التصميم الهندسي على الضياع الطاقوي. 2.2.IV |
| 66 | خصائص التوزيع الحراري. 3.2.IV |
| 68 | مؤشر تجانس درجة الحرارة. 4.2.IV |
| 69 | نسبة الفائدة (Advantage Rate). 4.2.IV |
| 70 | دراسة التصميم المزدوج (Two Stages). 3.IV |
| 70 | تأثير التصميم المستقيم المزدوج على معامل الحمل الحراري. 1.3.IV |
| 71 | تأثير التصميم المستقيم المزدوج على هبوط الضغط. 2.3.IV |
| 71 | خصائص التوزيع الحراري للتصميم المزدوج. 3.3.IV |
| 73 | تأثير اتجاه التدفق. 1.3.3.IV |
| 74 | تأثير طبيعة السائل المتدفق. 2.3.3.IV |
| 77 | التحسين من جودة هندسة القنوات المزدوجة. 4.3.IV |
| 79 | خلاصة. 3.IV |
| 81 | خلاصة عامة. |
| 84 | قائمة المراجع. |

قائمة الأشكال

الفصل الأول

- 6 بطارية الغاز للكيميائي Sir William Grove (1.I)
- 8 أنواع مختلفة لخلايا الوقود (2.I)
- 10 رسم توضيحي لمكدس خلية وقود PEMFC (3.I)
- 10 المكونات الأساسية لخلية وقود PEM (4.I)
- 11 بنية غشاء نافيون ومسامات مجهرية مشبعة بالماء (5.I)
- 12 رسم تفصيلي لبنية طبقة المحفز (CL) (6.I)
- 14 مقطع عرضي تخطيطي لنموذج خلية PEMFC: تموضع (MPL) على (GDL) (7.I)
- 15 تصميم الألواح ثنائية القطب: (a) serpentine سربنتيني، (b) parallel متوازي، (c) سربنتيني متوازي، (d) interdigitated متداخل، (e) grid شبكي، (f) spiral-serpentine سربنتيني حلزوني (8.I)
- 16 مبدأ عمل PEMFC (9.I)
- 19 منحني الاستقطاب مع مختلف الجهود الزائدة (10.I)

الفصل الثاني

- 28 رسم تخطيطي لطرق التبريد المختلفة لخلية الوقود PEM (1.II)
- 29 صفيحة جرافيت موصلة حرارياً (PGS) منطبقة على لوحة قناة التدفق السربنتينية (2.II)
- 31 نظام التبريد بالسائل (الماء) (3.II)
- 32 رسم تخطيطي لمكدس خلايا الوقود ولوحة التبريد الخاصة بها (4.II)
- 33 بنية قناة السائل في لوحة التبريد: (a) و (b) و (c) نماذج من النوع السربنتيني، (d) و (e) و (f) نماذج من النوع المتوازي (5.II)
- 34 تصميم مجالات تدفق المبرد: (a) سربنتيني تقليدي، (b) و (c) و (d) و (e) مجالات سربنتينية متعددة الممرات (MPSFFs)، (f) مجال تدفق حلزوني تقليدي (6.II)
- 35 تصميمات مجال تدفق المبرد: (a) و (b) سربنتيني تقليدي بثلاثة وخمسة مسارات متوازية، (c) و (d) سربنتيني نموذجي بثلاثة وخمسة مسارات متوازية، (e) حقل تدفق مستقيم بـ 45 مسار متوازية، (f) مجال تدفق حلزوني بخمسة مسارات متوازية. (7.II)
- 36 تصميمات قنوات الغاز والمبرد Sasmito et al: (a) الزعانف المائلة، (b) تصميم هجين ذات زعانف متوازية وسربنتينية ومائلة. (8.II)
- 36 تصميم مجال تدفق مسامي ذو رغوة معدنية. (9.II)
- 37 تكوينات لوحة التبريد: (a) سربنتيني تقليدي، (b) حلزوني تقليدي، (c) السربنتيني المقسم، (d) الحلزوني المقسم، (e) السربنتيني الموزع، (f) الحلزوني الموزع. (10.II)
- 38 تصميم مجال تدفق ذو قنوات منكسرة (zigzag). (11.II)

- 39 (a) قنوات تبريد موجية الشكل، (b) منظر قريب للقناة المتموجة. (12.II)
- 40 مخطط تصميم حقول التدفق: (1) تدفق متعدد السريبتين، (2) تدفق متعدد المنعطفات، (3) متعدد (13.II)
- الحلزونات، (4) لوحة موحدة، (5) بهيكل خلية النحل.

الفصل الثالث

- 47 رسم تخطيطي يوضح تقسيم المجال الحسابي في محاكاة Ansys Fluent، (a) التوليد الشبكي، (1.III)
- (b) أشكال حجوم منتهية مختلفة
- 48 رسم تخطيطي لخطوات المحاكاة على برنامج Ansys Fluent (2.III)
- 49 رسم تخطيطي للنصف العرضي للوحة تبريد خلية PEMFC المنمذجة (3.III)
- 50 التصميمات الهندسية الخمسة المنمذجة في هذا العمل (4.III)
- 51 التوليد الشبكي للتصميمات الخمسة (5.III)
- 54 الشروط الحدية لمحاكاة النماذج الخمسة (6.III)
- 57 تقييم المخلفات (البقايا) خلال تكرارات الحساب لهذا العمل (7.III)

الفصل الرابع

- 63 تباين معامل النقل الحراري (h) بدلالة رينولدز (Re) للنماذج الأحادية الأربعة للسائل النانوي (1.IV)
- (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وايتيلين جلايكول:40)
- 64 تغيرات عدد نيوستل Nu بدلالة عدد Re للنماذج الأحادية الأربعة للسائل النانوي (خليط (2.IV)
- $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$.
- 65 تغيرات هبوط الضغط (ΔP) بدلالة (Re) للسائل (خليط $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$ للنماذج (3.IV)
- الأحادية الأربعة.
- 65 تغيرات طاقة الضخ للسائل النانوي (خليط $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$ للنماذج الأحادية (4.IV)
- الأربعة بدلالة (Re).
- 66 توزيع درجة حرارة اللوحة (المنطقة الصلبة ومنطقة السائل النانوي) للنماذج الأحادية الأربعة (5.IV)
- (A,B,C,D) عند $(Re=120)$.
- 67 خصائص النقل الحراري للنماذج الأحادية الأربعة بدلالة رينولدز: (A) درجة الحرارة القصوى (B) (6.IV)
- متوسط درجة الحرارة، (C) الفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا.
- 68 مؤشر تجانس درجة الحرارة للسائل (خليط $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$ للنماذج الأحادية (7.IV)
- الأربعة بدلالة (Re).
- 69 نسبة الفائدة (AR) للنماذج الأحادية المتعرجة (B,C,D) بالنسبة للنموذج المستقيم (A) للسائل (خليط (8.IV)
- $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$.
- 70 تباين معامل الحمل الحراري (h) بدلالة التدفق الحراري (q) للنموذج المستقيم العادي والنموذج (9.IV)
- المزدوج للسائل النانوي (خليط $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$ عند $(Re=120)$.
- 71 تغيرات هبوط الضغط (ΔP) بدلالة (Re) للسائل (خليط $(Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40)$ (10.IV)
- للمنودجين المستقيم الأحادي والمزدوج.

- 72 (11.IV) خصائص النقل الحراري للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنموذجين المستقيم الأحادي والمزدوج بدلالة التدفق الحراري (q): (a) درجة الحرارة القصوى (b) الفرق بين درجة الحرارة القصوى والدينا، (c) مؤشر تجانس درجة الحرارة.
- 73 (12.IV) توزيع درجة الحرارة في اللوحة من الأسفل للنماذج (A,E,F) للسائل النانوي ($Al_2O_3:0.5\%$ - $W:60/EG:40$) عند ($Re=120$).
- 74 (13.IV) تأثير التدفق الحراري على معامل الحمل الحراري للتدفق المشترك والمتعاكس للنموذج المزدوج لكل من السائلين ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) عند ($Re=120$).
- 75 (14.IV) توزيع درجة حرارة اللوحة جهة السوائل للنموذج المزدوج لحالات التيار المشترك والتيار المتعاكس لكل من السائلين ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) عند ($Re=120$ و $q=12000W/m^2$).
- 76 (13.IV) تغيرات هبوط الضغط بدلالة (Re) للتدفق المشترك والمتعاكس للنموذج المستقيم المزدوج لكل من السائلين ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) عند ($q=12000W/m^2$).
- 76 (16.IV) نسبة الفائدة (AR) للسوائل ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) المتدفقة في القنوات المستقيمة المزدوجة.
- 77 (17.IV) رسم تخطيطي يوضح لوحة تبريد مزدوجة القنوات.
- 78 (18.IV) تغيرات خصائص النقل الحراري بدلالة (q) للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنموذج المستقيم المزدوج عند التغيير في ارتفاع الطبقة الوسطى بين القنوات.
- 79 (19.IV) تغيرات خصائص النقل الحراري بدلالة (q) للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنموذج المستقيم المزدوج عند التغيير في النسبة بين القنوات (Rib).

قائمة الجداول

الفصل الأول

- 9 الخصائص الرئيسية لأنواع مختلفة من خلايا الوقود (1.I)

الفصل الثاني

- 30 الحلول الممكنة لتبريد PEMFC (1.II)
41 خصائص المائع النانوي المستخدم لتبريد PEMFC (2.II)

الفصل الثالث

- 56 الخصائص الهندسية والفيزيائية وشروط التشغيل المستخدمة في هذا العمل (1.III)
58 اختبار استقلال الشبكة للتصميم المستقيم (2.III)
58 اختبار استقلال الشبكة للتصميم المنكسر (3.III)
59 اختبار استقلال الشبكة للتصميم المتموج (4.III)
59 اختبار استقلال الشبكة للتصميم -S- (5.III)
59 اختبار استقلال الشبكة للتصميم (Two Stages) (6.III)
60 مقارنة النموذج الحالي مع عمل Baek et al. (7.III)
60 مقارنة النموذج الحالي مع عمل Zakaria et al (8.III)
61 مقارنة النموذج الحالي مع عمل Li and Sundén (9.III)

الفصل الرابع

- 67 ملخص النتائج العددية للنماذج الأحادية الأربعة (A,B,C,D) للسائل النانوي (خليط - $Al_2O_3: 0.5\%$) عند (W:60/EG:40) (Re=120) (1.IV)

قائمة الرموز

❖ الرموز

| الرمز | المقدار الفيزيائي | الوحدة |
|-----------------|---|--------------------------------------|
| I | شدة التيار الكهربائي | A |
| F | ثابت فراداي | C.mol ⁻¹ |
| \dot{m}_{H_2} | معدل التدفق الكتلي للهيدروجين | g/s |
| \dot{m}_{O_2} | معدل التدفق الكتلي للأكسجين | g/s |
| M_{H_2} | الكتلة الجزيئية للهيدروجين | g/mol |
| M_{O_2} | الكتلة الجزيئية للأكسجين | g/mol |
| ΔH | المحتوى الحراري (انتالبي لكل مول من المادة) | J/mol |
| ΔS | الانتروبي | J.K ⁻¹ .mol ⁻¹ |
| ΔG | الطاقة الحرة لجيبس | J/mol |
| W_{elc} | العمل الكهربائي | J/mol |
| $E_{T,P}$ | الجهد اترموديناميكي (النظري) | V |
| R | ثابت الغازات المثالية | / |
| P | الضغط | Pa |
| T | درجة الحرارة | K |
| V_{act} | الجهد الزائد الناتج عن التنشيط | V |
| I | كثافة التيار | A/m ² |
| i_0 | كثافة تيار التبادل | A/m ² |
| α | معامل نقل الشحنة | / |
| V_{ohm} | الجهد الزائد الناتج عن المقاومة | V |
| R_{ohm} | المقاومة الأومية | Ω |
| V_{con} | الجهد الزائد الناتج عن التركيز | V |
| i_L | التيار المحدد | A/m ² |
| V_{cell} | الجهد الفعلي (الصافي) | V |
| P | الاستطاعة | W |
| A | سطح القطب الكهربائي | cm ² |
| η | الكفاءة | / |
| q_{rec} | الحرارة الناتجة عن الأنتروبي | J.mol ⁻¹ |
| q_{act} | الحرارة الناتجة عن التنشيط الكهروكيميائي للمتفاعلات | J.mol ⁻¹ |

| | | |
|----------------------------|--|-----------------------|
| j.mol^{-1} | حرارة امتصاص/امتزاز الماء | q_{sorp} |
| j.mol^{-1} | حرارة تغير الطور للماء | $q_{c/v}$ |
| mol | كمية الماء المراد تكثيفها | $n_{v \rightarrow l}$ |
| j.mol^{-1} | الحرارة الكامنة للماء | L_v |
| j.mol^{-1} | الحرارة الناتجة عن تأثير جول | q_J |
| m/s | مركبات السرعة في الاتجاهات x، y، z على التوالي | w، v، u |
| S/m | الناقلية الكهربائية للمادة | Σ |
| kg/m^3 | تمثل الكثافة | P |
| kg/m.s | اللزوجة الحركية | M |
| W/m.K | الناقلية الحرارية | K |
| K | درجة الحرارة | T |
| K | درجة الحرارة القصوى | T_{max} |
| K | ومتوسط درجة الحرارة | T_{avg} |
| K | الفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا | ΔT |
| K | مؤشر تجانس درجة الحرارة | U_T |
| / | عدد رينولدز | Re |
| mm | القطر الهيدروليكي | D_h |
| / | عدد نيوست | N_u |
| j.s^{-1} | طاقة الضخ | W_p |
| $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ | معدل تدفق السائل النانوي في القناة | Q_v |
| Pa | هبوط الضغط | ΔP |
| mm | الأبعاد (الطول، العرض، الارتفاع) | H، W، L |

❖ المؤشرات

| المصطلح بالعربي | المصطلح بالانجليزي | المؤشر |
|------------------|----------------------------|--------|
| مصعد (كاتود) | cathode | c |
| مهبط (انود) | anode | a |
| التنشيط | activation | act |
| الأومي | ohmic | ohm |
| التكاثف | concentration | con |
| التفاعل | reaction | reac |
| الامتصاص | sorption | sorp |
| التكاثف والتبخير | condensation / evaporation | c/v |
| جول | Joule | J |

| | | |
|----------------|-----------|----|
| المائع النانوي | nanofluid | nf |
| المنطقة الصلبة | solid | s |

❖ الاختصارات

| المصطلح بالعربي | المصطلح بالانجليزي | الاختصار |
|---------------------------------------|--|----------|
| خلية وقود غشاء التبادل البروتوني | Proton Exchange Membrane Fuel Cell | PEMFC |
| التوليد المشترك للطاقة | Combined Heat Power | CHP |
| طبقة المحفز | Catalyst Layer | CL |
| طبقة انتشار الغاز | Gas Diffusion Layer | GDL |
| تجميع القطب غشاء | Membrane Electrode Assembly | MEA |
| قنوات الغاز | Gas Channels | GCs |
| الصفائح ثنائية القطب | BiPolar Plates | BPPs |
| البلاتين | Platine | Pt |
| الحد الثلاثي الطور | Three Phase Boundary | TPB |
| ديناميكا الموائع الحسابية | Computational Fluids Dynamic | CFD |
| طريقة الحجوم المنتهية | Finit Volume Method | FVM |
| ماء ايثيلين / الجلايكول | Water/Ethylene Glycol | W/E |
| طريقة شبه ضمنية لربط المعادلات بالضغط | Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations | SIMPLE |
| نسبة الفائدة | Advantage Rate | AR |

مقدمة عامة

مقدمة عامة

إن استنفاد الموارد الأحفورية من أكثر القضايا التي تُشغل العالم، خاصة مع تزايد دخول الدول النامية مجال التصنيع. أيضًا، أثبت المجتمع العلمي الدور الذي تلعبه عمليات إحتراق الوقود الهيدروكربوني في ظاهرة الاحتباس الحراري العالمي، والتي يمكن أن تكون عواقبها مأساوية في المستقبل القريب [1,2]. للحد من هذه المشاكل، ونظرًا لارتفاع طلب الطاقة تكثفت دراسات عالمية حول البحث عن إيجاد مصادر طاقة قوية مستدامة ومتجددة، بديلة عن الوقود الأحفوري وذات تأثير إيجابي على البيئة. صنّفت هذه المصادر إلى فئات نذكر منها: الطاقة الشمسية، الطاقة الحرارية الأرضية، طاقة الرياح، الكتلة الحيوية، الطاقة الكهرومائية والطاقة الهيدروجينية.....[3,4].

حاليًا، يتم تفضيل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح حيث تنتج توربينات الرياح والألواح الشمسية الكهرباء، لكن من الصعب استخدام هذه الطاقة خاصة في تطبيقات السيارات لأنه لا توجد حتى الآن طريقة فعالة لتخزينها. إضافة إلى ذلك، وقت استهلاك الكهرباء لا يتوافق دائمًا مع وقت توفر الشمس والرياح. ومن طرق تجنب هذه المشاكل تحويل الكهرباء إلى طاقة كيميائية تُخزن وتُنقل وتحوّل مرة أخرى إلى كهرباء عند الضرورة [3].

تعتبر خلايا الوقود إحدى التقنيات الفعالة لإنتاج الطاقة الكهربائية بطريقة بسيطة، هذه التقنية تحول الطاقة الكيميائية (تفاعل الوقود كغاز الهيدروجين أو الميثان، أو الديزل مع أكسجين الهواء أو النقي) مباشرة إلى طاقة كهربائية دون إحتراق أو تدخل طاقة ميكانيكية. على الرغم من الصعوبات التي تواجهها تكنولوجيا خلايا الوقود الآن، والتي تمثلت خصوصًا في التكلفة الباهضة في مواد تصنيعها، إلا أنها تعتبر البديل الطاقوي الواعد في المستقبل [5,6]. بعد حوالي 150 سنة من الأبحاث، قسّمت صناعة خلايا الوقود إلى عدة أنواع، يمكن تصنيفها حسب طبيعة الإلكتروليت والوقود المستخدم ودرجة حرارة التشغيل [7,8]. ومن بين هذه الأنواع نجد خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) وهو هدف عملنا.

تعتبر خلية وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) المرشح المحتمل لمصدر الطاقة النظيفة والنقل والتطبيقات الثابتة، وذلك بفضل مزاياها الجذابة؛ كالكثافة الطاقوية العالية، وبدء تشغيل سريع، ودرجة حرارة تشغيل منخفضة ($60-100^{\circ}\text{C}$) مقارنة بالأنواع الأخرى لخلايا الوقود [9,10,11]. تم إحرار تقدم كبير في البحث والتطوير لمواد تصنيع PEMFC، لكن هناك العديد من العوائق التقنية التي تعيق تسويقها على نطاق واسع في قطاعات النقل والتطبيقات الثابتة والمحمولة. وتشمل هذه العوامل؛ عدم كفاية إدارة المياه والحرارة، وعدم تحمل الشوائب (CO_2)، وحركية تفاعل الكاتود الكهروكيميائي البطيء، وارتفاع تكلفتها [11,12].

يتكون جهاز PEMFC من أربعة مكونات أساسية، وتتمثل في غشاء بوليمري كإلكتروليت يفصل بين أنود وكاتود الخلية، طبقات محفزة للتفاعلات الكيميائية، طبقات لانتشار الغازات، وألواح ثنائية القطب توضع على الجوانب الخارجية [13,14,15]. أثناء تشغيل الخلية يتم تغذية الهيدروجين في جانب الأنود وينقسم تحفيزيًا إلى بروتونات والإلكترونات، يتم نقل البروتونات عبر الغشاء، بينما تنتقل الإلكترونات عبر مجمع التيار الكهربائي نحو دارة خارجية مما يتم إنتاج الكهرباء. وعلى جانب الكاتود، يتدفق غاز الأكسجين في قنوات التدفق ويصل إلى طبقة الكاتود المحفزة فيتحد مع بروتونات الهيدروجين والإلكترونات الدارة

الخارجية لتكوين الماء. يؤدي تكوين الماء والمقاومة الداخلية للدارة الكهربائية إلى توليد الحرارة كمنتج ثانوي آخر، ويكون التركيز أعلى عادة في جانب الكاثود [16,17].

على الرغم من أن PEMFC تتمتع بكفاءة عالية جدًا في تحويل الطاقة، إلا أنه لا يزال هناك قدر كبير من الحرارة المتولدة مقارنةً بالطاقة الكهربائية المنتجة [18]. يجب إزالة الحرارة الزائدة بشكل فعال لتجنب ارتفاع درجة حرارة مكونات الخلية. يمكن أن تؤدي درجة الحرارة المرتفعة إلى تدهور الغشاء والمحفز، أي ارتفاع مقاومة نقل الشحنة وتقليل أداء الخلية، في حين أن درجة الحرارة المنخفضة ليست مناسبة لحركية التفاعل وقد تسبب أيضًا فيضًا بسبب انخفاض ضغط تشبع الماء الناتج عند مستويات أقل درجات حرارة، وهو ما يشكل قلق كبير من منظور إدارة الماء [19]. لذلك تعد الإدارة الحرارية في خلية PEMFC أمرًا بالغ الأهمية، إذ تركز على تحقيق درجة حرارة الخلية المثلى للتفاعلات الكهروكيميائية مع قيود في الحفاظ على مستويات ترطيب الغشاء المطلوبة [20,21]، كما تركز على توحيد درجة الحرارة في الخلية لتجنب الضغوط الحرارية الداخلية.

هناك محاولات مختلفة قام بها الباحثون في جميع أنحاء العالم لتحسين الإدارة الحرارية في خلايا PEMFC وتمثلت في تحقيق نظام تبريد فعال. حاليًا، تدرس تقنيات تبريد مختلفة ترتبط بظروف وعوامل خاصة ولها مزاياها وقيودها وتحدياتها، وتعتمد على عدة عوامل: طاقة الخرج للخلية، المتانة، التطبيق وكمية الحرارة المستردة (على سبيل المثال التوليد المشترك للحرارة والطاقة) والتكلفة..... وغيرها [22,23]. من بين تقنيات التبريد هذه، نجد التبريد بالسائل هو الأكثر ملائمة خاصة للتطبيقات التي تستخدم مكدرات PEMFC بقدرة أعلى من 10KW كالسيارات [24]، وذلك لسماته البارزة: ليس له قيود من حيث الحجم والوزن وتعقيد النظام، لديه معدل إزالة حرارة عالي بسبب الموصلية والسعة الحرارية العالية للسائل [25].

وللحصول على تصميم مكدرات PEMFC أكثر إحكامًا، تكثفت دراسات وأبحاث حول تعزيز نظام التبريد بالسائل، حيث أشارت الدراسات؛ إلى أنّ العمل على تحسين تصميم ألواح التبريد وهندسة قنوات تدفق السائل المبرد له دور فعال في الحصول على درجة حرارة مثلى للعمليات الداخلية التي تحدث في الخلية، أي الحصول على أداء أفضل. كما أشارت إلى أنه يجب استخدام مبردات ذات خصائص حرارية فيزيائية أفضل من السوائل التقليدية، للحصول على تأثيرات تبريد مماثلة مع انخفاض معدلات التدفق [26,27,28]. في العقد الأخير، طبقت السوائل النانوية كسائل تبريد في خلايا الوقود، تهدف إلى إطالة متانة سائل التبريد مع الحفاظ على موصلته الكهربائية المنخفضة حتى بعد عامين [28]، كما أن استخدام نظام التبريد بالسائل النانوي في تطبيقات مكدرات PEMFC يسمح بتقليل الملحقات التي تزيد من وزن النظام كحذف مزيلات الأيونات الناقلة كهربائياً واستخدام مضخات مياه أصغر [28].

عادةً ما تكون العمليات الداخلية؛ التي تشمل نقل الكتلة والشحنة، نقل الحرارة والتفاعلات الكهروكيميائية التي تحدث في نظام PEMFC معقدة، و تتطلب معدات وتكنولوجيا باهظة الثمن [29,30]. هذا ما أدّى المجتمع العلمي إلى تكوين نماذج رياضية مناسبة لفهم عميق لتلك العمليات [31]، وباستخدام هذه النماذج ساهم في محاكاة العديد من مكونات الخلية وظروف التشغيل [32]. في الآونة الأخيرة، حظيت محاكاة PEMFC بقدر كبير من الاهتمام، ومن بين أدوات وأساليب النمذجة الشهيرة، تعتبر ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) أداة أكثر قوة نظرًا لقدراتها الجيدة في توضيح فيما يتعلق بأداء PEMFC [33,34].

على هذا السياق، يركز البحث على دراسة أحد القيود الرئيسية لخلايا PEMFC والتي تتمثل في نقل الكتلة والحرارة في قنوات تدفق السوائل المبردة لألواح التبريد. حيث يحتوي هذا البحث على أربعة فصول:

في الفصل الأول، نقدم وصفاً عاماً لخلايا الوقود وبعض أنواعها الشهيرة وأهم مجالات تطبيقاتها المختلفة، حيث يشمل هذا الوصف بصورة خاصة مبدأ التشغيل لخلية وقود PEMFC وشرحاً تفصيلياً للأجزاء الرئيسية المختلفة التي تشكلها. إضافة إلى ذلك، نقدم شرحاً موضوعياً لأداء الخلية المتمثل في التيار والجهد الكهربائي والكفاءة الطاقوية. وفي نهاية الفصل نوضح مصادر الحرارة في الخلية وتأثيرها على الأداء الكلي.

في الفصل الثاني، نقوم بجمع أهم الدراسات السابقة التي تمحورت حول كيفية تعزيز الإدارة الحرارية في خلية PEMFC وتبريدها، نقدم بعض الدراسات التي خصصت طريقة التبريد بالسوائل وتأثير الشكل الهندسي لمجالات تدفق سوائل التبريد مع مزاياها وعيوبها. إضافة إلى ذلك، نستشهد بمختلف الأعمال التجريبية والعديدية الحديثة المتعلقة بتطوير سائل التبريد من السائل التقليدي إلى السوائل النانوية المعززة حرارياً لتحسين أداء الخلية بطريقة فعالة.

في الفصل الثالث، نعرض الوصف الهندسي لتشكيلات مختلفة لمجالات التدفق المستخدمة في هذه الدراسة مع طبيعة السائل المبرد المستعمل والمتمثل في المائع النانوي. يليه وصف لظاهرة النقل التي تحدث في ألواح التبريد، بالإضافة إلى وصف للمعادلات المختلفة التي تحكم هذه الظاهرة. كما نقوم بإجراء حل المعادلات الحاكمة باستخدام أداة ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) بتطبيق برنامج Ansys Fluent. كما نعرض التحقق من صحة تطبيق النموذج مع ثلاث أعمال مرجعية.

وفي الفصل الأخير، نقدم النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها. في البداية نعرض مقارنة النتائج بين التصميمات المختلفة ذات القناة الأحادية، وذلك من حيث تأثير التصميم الهندسي على نقل الحرارة والضياع الطاقوي (هبوط الضغط وطاقة الضخ) وخصائص التوزيع الحراري. ثم نعرض مقارنة نتائج القناة المستقيمة الأحادية مع قناة مستقيمة مزدوجة التدفق، كما نقدم نتائج محاكاة دراسة تأثير اتجاه تدفق السوائل النانوية في القنوات المزدوجة وطبيعتها على أداء تبريد خلية PEMFC.

الفصل الأول

أساسيات خلية وقود غشاء
التبادل البروتوني PEMFC

1.1. مقدمة

خلية الوقود عبارة عن جهاز كهروكيميائي يحول الطاقة الكيميائية لتفاعل أكسدة الوقود مباشرة إلى كهرباء. تختلف اختلافاً جوهرياً عن محولات الطاقة الحرارية التقليدية، حيث يتأكسد الوقود في عملية الاحتراق وتنتج الكهرباء من خلال الطاقة الحرارية والميكانيكية. يتم تحقيق الكفاءة الكهربائية في حدود (60%) بسهولة بواسطة خلايا الوقود على عكس الكفاءة المحدودة لدورة كارنو لمحولات الطاقة التقليدية (محركات الاحتراق الداخلي والتوربينات) [36,35].

تتكون خلية الوقود من قطبين مساميين (كاتود وأنود) مفصولين بواسطة إلكتروليت (وسط منحل بالكهرباء)، حيث يتم تغذية الأنود بوقود غازي كالهيدروجين، والكاتود بواسطة مادة مؤكسدة كالأكسجين. يتفكك الوقود عند الأنود إلى أيونات وإلكترونات، حيث تمر الإلكترونات عبر دارة خارجية للتزويد بالتيار الكهربائي، بينما تتحرك الأيونات عبر الإلكتروليت باتجاه الكاتود فيحدث تفاعل الأيونات مع الإلكتروليت والمؤكسد مما ينتج عنه الماء، كما تتولد عن هذه التفاعلات المختلفة عند الأقطاب الكهربائية حرارة [37,5].

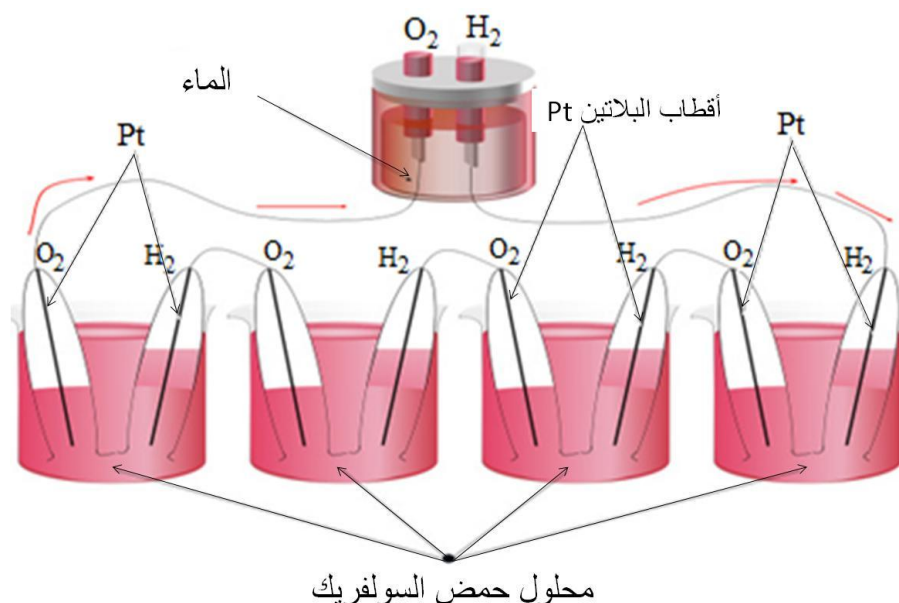
حالياً، تمّ تصنيع عدة تقنيات مختلفة لخلايا الوقود تختلف عن بعضها حسب طبيعة المكونات ونوع التطبيقات المطلوبة. خلية وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) إحدى أنواع خلايا الوقود المناسبة أكثر خاصة لمركبات النقل، نظراً لمزاياها: كثافة تيار عالية، مدة زمنية قصيرة للتشغيل، درجة حرارة التشغيل المنخفضة $60-100^{\circ}\text{C}$ ، الاستجابة السريعة للشحن، عمر عمل أطول والتفريغ الذاتي المنخفض جداً [38,10,9]. في هذا الفصل نركز على وصف أساسيات PEMFC، حيث يشمل الوصف مبدأ تشغيل الخلية ووصف دقيق لمكوناتها وأدائها.

2.1. تكنولوجيا خلايا الوقود

تعد تقنية خلايا الوقود (FC) بديلاً واعداً للوقود الهيدروكربوني لتوفير الطاقة، خاصة للمناطق الريفية التي لا يوجد فيها وصول مباشر إلى الشبكة العامة، أو تتطلب تكلفة ضخمة لتوصيل الأسلاك ونقل الكهرباء. إنّ استخدام (FC) لمختلف التطبيقات يمكن أن يساعد بلدان العالم على التقدم اقتصادياً واجتماعياً وبيئياً. ويمكن للتطبيقات ذات المتطلبات الأساسية الآمنة للطاقة الكهربائية كمحطات توليد الطاقة والأنظمة الموزعة والمشاركة (حرارة/كهرباء) أن تستخدم خلايا الوقود كمصدرًا للطاقة [39]، إضافة إلى التصميم البسيط لخلايا الوقود واستخدامها الهيدروجين كمادة متفاعلة يجعلها أكثر أنظمة الطاقة النظيفة من الناحية البيئية [40]. حالياً، يتم استخدام أنظمة خلايا الوقود في العديد من المجالات، مثل أنظمة التوليد المشترك للطاقة وأنظمة الطاقة المتنقلة وأجهزة الكمبيوتر المحمولة ومعدات الاتصالات العسكرية [40].

1.2.1. تاريخ تقنية الخلايا الوقودية

يرجع أصل تقنية خلايا الوقود إلى الفيلسوف الكيميائي Sir William Grove. أشارت أبحاثه بأن التحليل الكهربائي للماء يستخدم الكهرباء لتقسيم الماء إلى هيدروجين وأكسجين حتى توصل إلى أن التفاعل المعاكس يجب أن يكون قادراً على إنتاج الكهرباء. باستخدام هذه الفرضية وفي عام 1838، طور جهازاً يجمع بين الهيدروجين والأكسجين لإنتاج الكهرباء (أول بطارية تعمل بالغاز في العالم) [41]، بطارية الغاز هذه أصبحت تعرف باسم خلية الوقود. الشكل (1.1) يوضح تجربة Grove، استعمل في تجربته أنبوب على شكل حرف U مع قطبين مساميين من البلاتين (كمحفز) ومحلول حمض السولفوريك كإلكتروليت.



الشكل (1.1): بطارية الغاز للكيميائي Sir William Grove [41].

لم يحاول أحد الاستفادة من المفهوم الذي أوضحه Grove. حتى عام 1889، أجرى الكيميائي L.Mond مع مساعده C.Langer عدة تجارب على خلية الوقود حيث قاما بهندسة خلية تعمل بغاز مشتق من الفحم، حققا خلية وقود أنتجت $6A/ft^2$ عند $0.73V$ ، لكن واجها مشاكل في استخدام الإلكتروليتات السائلة نجحا فقط باستخدام إلكتروليت شبه صلب مبلل بمواد مسامية غير موصلة [42].

في 1893، حدّد F.W.Ostwald مؤسس الكيمياء الفيزيائية تجريبياً العلاقة بين المكونات المختلفة لخلية الوقود، بما في ذلك الأقطاب الكهربائية والإلكتروليت وعامل الأكسدة والإرجاع والأنيونات والكاتيونات [43]. فتح عمل Ostwald الأبواب في مجال أبحاث خلايا الوقود من خلال توفير المعلومات لباحثي خلايا الوقود في المستقبل.

استمرت محاولات البحث، لكن بسبب تطوير محرك الاحتراق الداخلي جعل البحث في تكنولوجيا خلايا الوقود غير ضروري. وفي ثلاثينات القرن العشرين، أجرى E.Baur وطلابه عدة تجارب على أنواع مختلفة لخلايا الوقود. وفي 1937، قاما بأول عملية لخلايا الوقود الخزفية ذات درجات الحرارة العالية تصل إلى $1000^{\circ}C$ استخدمت أكسيديا معدنيا (الفضة المصهورة) كإلكتروليت [44].

أجرى T. Bacon أبحاثاً وعمليات تطوير مهمة باستخدام خلايا وقود عالية الضغط. نجح في تطوير خلية وقود تستخدم أقطاب من النيكل وتعمل بضغط عالية. وفي عام 1958، أدى عمله إلى تطوير خلية قلوية باستخدام حزمة من الأقطاب الكهربائية بقطر 10 ميكرومتر. كانت تطورات Bacon ناجحة بما يكفي حيث تم ترخيص عمله واستخدامه لخلايا الوقود القلوية في مركبة الفضاء أبولو (APOLLO) التابعة لوكالة ناسا الأمريكية (NASA). ولا يزال استخدام هذه التقنية في المركبات الفضائية [45].

في 1960، اخترع L.Niedrach و T.Grubb تقنية خلايا وقود ذات غشاء بوليمري مع محفزات بلاطينية (PEMFC) استخدمت في شركة جنرال إلكتريك (GE)، حيث تمّ تغذية الخلية بالهيدروجين الناتج عن خلط الماء وهيدريد الليثيوم، لكن واجها مشكلة في التكلفة الباهضة للمحفزات البلاطينية [45].

بحثت (NASA) في البداية عن تقنية PEMFC لمشروع (Gemini) في برنامج الفضاء الأمريكي. لكن أول تقنية واجهت عدة صعوبات تمثلت في تلوث المكونات الداخلية للخلية وتسرب الأكسجين عبر الغشاء. لذلك أعادت شركة (GE) تصميم خلية الوقود القلوية، وكان هذا النموذج مناسباً لسفینتي الفضاء (Gemini) و (Appolo)، وذلك باعتبار خلايا الوقود القلوية أفضل من حيث الأداء والمتانة في ذلك الوقت [42].

في الثمانينيات، حققت مركبات PEMFCs تقدماً كبيراً عندما تم اكتشاف أغشية بوليمرية ذات ثبات وأداء أكبر. واصلت شركة (GE) العمل على PEMFC وصممت تقنية المحلل الكهربائي للماء PEM لإنتاج الهيدروجين، مما أدى إلى إنشاء مصنع توليد الهيدروجين التابع للبحرية الأمريكية. واستخدمت البحرية البريطانية أيضاً خلايا PEM في غواصاتهم [45,42].

خلال التسعينيات، تم البحث عن تقنية PEMFC في نطاق واسع، ووفقاً لوزارة الطاقة الأمريكية PEMFC المرشح الأساسي للمركبات الخفيفة، وللمباني وربما لتطبيقات أصغر بكثير، مثل استبدال البطاريات القابلة لإعادة الشحن في كاميرات الفيديو [46,43]. تشتمل خلايا PEM بشكل أساسي على خلايا وقود الهيدروجين وخلايا وقود الميثانول المباشر، عملنا يهدف إلى دراسة خلايا وقود الهيدروجينية.

2.2.I. خصائص الخلايا الوقودية

تتميز خلايا الوقود بعدة مزايا تجعلها مفضلة عن جميع أجهزة تحويل الطاقة الأخرى، نذكر منها [47,44]:

- كفاءة عالية في تحويل الطاقة بنسبة (60% - 50) مستقلة عن الحجم والحمولة.
- التصميم المعياري لخلية الوقود يسمح بتكديسها لتحقيق الجهد والتيار المطلوب.
- القدرة على التوليد المشترك للطاقة (CHP) وذلك بسبب إمدادها المستمر للحرارة.
- مرونة الحجم، أي أن كل خلايا الوقود المختلفة الأحجام يمكن أن تحقق نفس الكفاءة.
- تأثير بيئي منخفض للغاية، وذلك لأن المنتجات الثانوية الغالبة تتمثل في الماء والحرارة.
- مرونة الوقود.
- قدرة سريعة على التحميل المستمر.

بالمقابل، توجد بعض القيود المشتركة لجميع أنظمة خلايا الوقود وهذا الأمر الذي لا يزال تحت البحث المكثف لإزالة عرقلة تقنية خلية الوقود، تشمل:

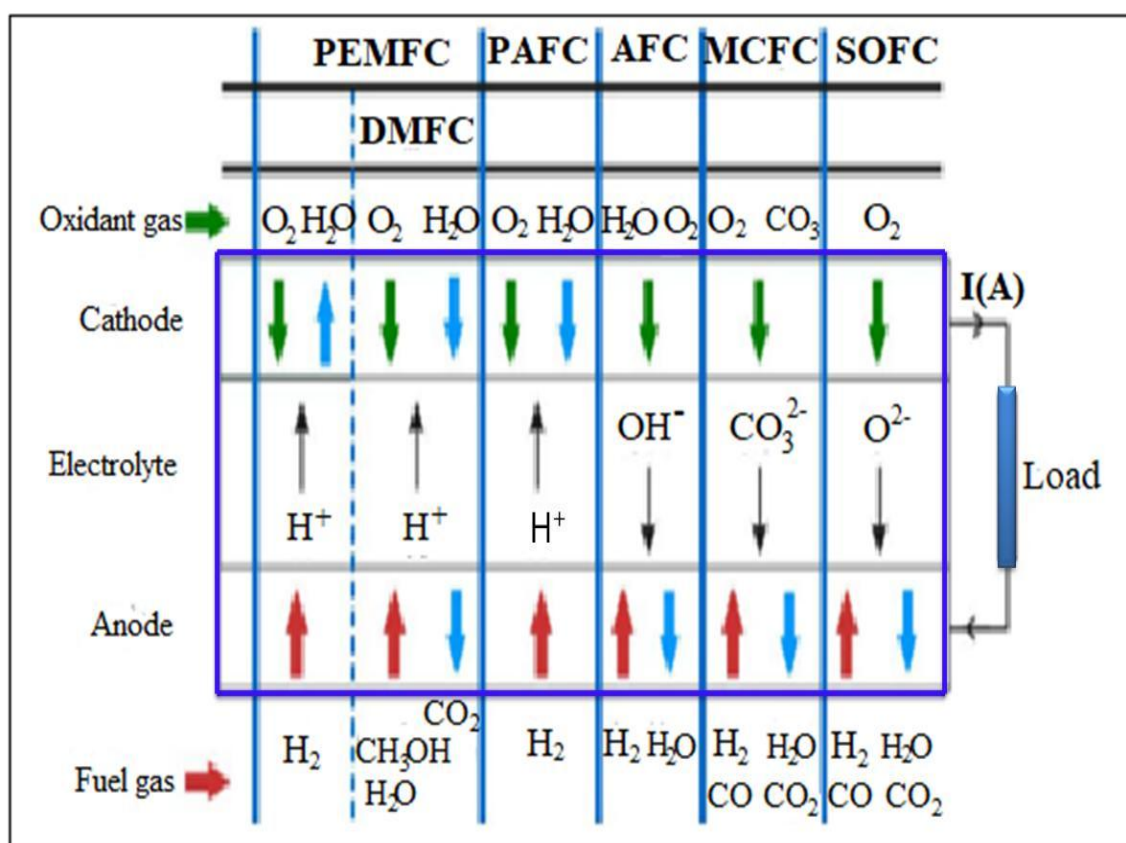
- خلايا الوقود مكلفة حالياً، بسبب الحاجة إلى مواد ذات خصائص محددة (كالبلاتين)، هناك مشكلة في العثور على مواد بديلة منخفضة التكلفة.
- قد تكون تقنية إعادة تهيئة الوقود مكلفة وثقيلة وتحتاج إلى طاقة لتشغيلها.
- حساسية لبعض ملوثات الوقود، إذا تم إدخال وقود آخر إلى جانب الهيدروجين في خلية الوقود، فإن الأداء ينخفض تدريجياً بمرور الوقت بسبب تدهور المحفز والتسمم بالكهرباء.
- لم يتم إثبات القدرة على التحمل (الموثوقية).

3.2.I. أنواع الخلايا الوقودية ومجالات تطبيقاتها

توجد مجموعة متنوعة من خلايا الوقود في مراحل مختلفة من التطور حتى اليوم. نذكر أشهر ستة تقنيات:

- الخلية القلوية (AFC) Alkaline fuel cell
- خلية وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) Proton exchange membrane fuel cell
- خلية وقود الميثانول المباشر (DMFC) Direct methanol fuel cell
- خلية وقود حمض الفوسفوريك (PAFC) Phosphoric acid fuel cell
- خلية وقود الكربونات المنصهرة (MCFC) Molten carbonate fuel cell
- خلية وقود الأكسيد الصلب (SOFC) Solid oxide fuel cell

عادةً، يمكن تصنيف خلايا الوقود اعتمادًا على: الوقود والمؤكسد، الإلكتروليت، درجة حرارة التشغيل، مجال التطبيق وما إلى ذلك. يعتمد التصنيف بشكل خاص على نوع الإلكتروليت المستخدم، حيث تعتمد درجة حرارة التشغيل و الوقود المستخدم وجميع العوامل الأخرى على نوع الإلكتروليت مما يجعله عاملاً مهمًا [7,8]. يلخص الشكل (2.I) الأنواع المختلفة لخلايا الوقود ويسرد الجدول (1.I) خصائصها الرئيسية وأهم تطبيقاتها.



الشكل (2.I): أنواع مختلفة لخلايا الوقود [48].

جدول (1.1): الخصائص الرئيسية لأنواع مختلفة من خلايا الوقود [49].

| SOFC | MCFC | PAFC | DMFC | PEMFC | AFC | نوع الخلية |
|---|--|--|-----------------------------------|--|-----------------------|-------------------------------|
| سيراميك: Y ₂ O ₃ - ZrO ₂ | KCO ₃ أو Li ₂ CO ₃ منصهر في LiAlO ₂ | حمض الفوسفوريك | غشاء بوليمر ناقل للبروتونات | غشاء بوليمر ناقل للبروتونات | محلول KOH | الالكتروليت |
| O ²⁻ | CO ₃ ²⁻ | H ⁺ | H ⁺ | H ⁺ | OH ⁻ | أيونات الالكتروليت |
| 700-1000 | 600-660 | 180-220 | 60-100 | 60-100 | 60-80 | درجة حرارة التشغيل (C°) |
| H ₂ (نقي أو معدّل) | H ₂ (نقي أو معدّل) | H ₂ (نقي أو معدّل) | الميثانول | H ₂ (نقي أو معدّل) | H ₂ نقي | الوقود |
| هواء | هواء | هواء | هواء | هواء | O ₂ (نقي) | المؤكسد |
| - الثابتة - (CHP) - الإنتاج المركزي للكهرباء - البحرية | - (CHP) - الإنتاج المركزي للكهرباء - البحرية | - الثابتة - التوليد المشترك للطاقة (CHP) | المحمولة | - المواصلات - المحمولة - الثابتة | الفضاء | التطبيقات |

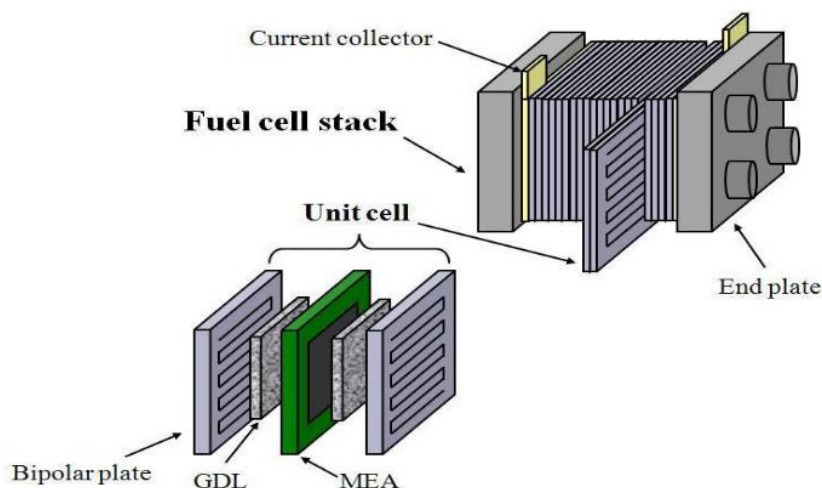
لكل نوع خصائص مميّزة ومختلفة، مما يسمح بتطبيقات متنوعة. لاختيار نوع خلية الوقود لأي تطبيق يلزم الموازنة بين مزاياها وعيوبها. من أجل التغلب على بعض العيوب يميل الباحثون إلى النظر في [41,40]: (1) زيادة درجة حرارة التشغيل لخلايا الوقود ذات درجات الحرارة المنخفضة (إلى حوالي 120C⁰) لتطبيقات النقل، وذلك لتقليل حجم الخلية وتحسين تسيير الماء الناتج. (2) التقليل من درجة حرارة التشغيل لخلايا الوقود ذات درجات الحرارة المرتفعة، للتقليل من قيود الحرارة وزمن بدء التشغيل والتكاليف مع إطالة عمر عمل الخلية.

3.1. خلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC

خلية وقود غشاء التبادل البروتوني عبارة عن نظام بسيط يتكون من مهبط (أنود) ومصعد (كاتود) وإلكتروليت فاصل بينهما مشابهة لجميع أنواع خلايا الوقود، باستثناء أن الأقطاب الكهربائية والإلكتروليت في خلية وقود PEM كلها أغشية مسامية. بتفاعلات الهيدروجين والأكسجين تنتج طاقة كهربائية، إضافة إلى ماء وحرارة.

بمقارنة أنواع خلايا الوقود، تتميز PEMFC بكثافة طاقة عالية وسرعة بدأ التشغيل، وزن خفيف وحجم صغير. هذا ما يجعلها من أكثر التقنيات الواعدة للاستخدام على أوسع نطاق. إضافة إلى ذلك، لا تتأثر بالتوجيه المكاني أو الاهتزاز، مما يجعلها مناسبة بشكل خاص للسيارات [50].

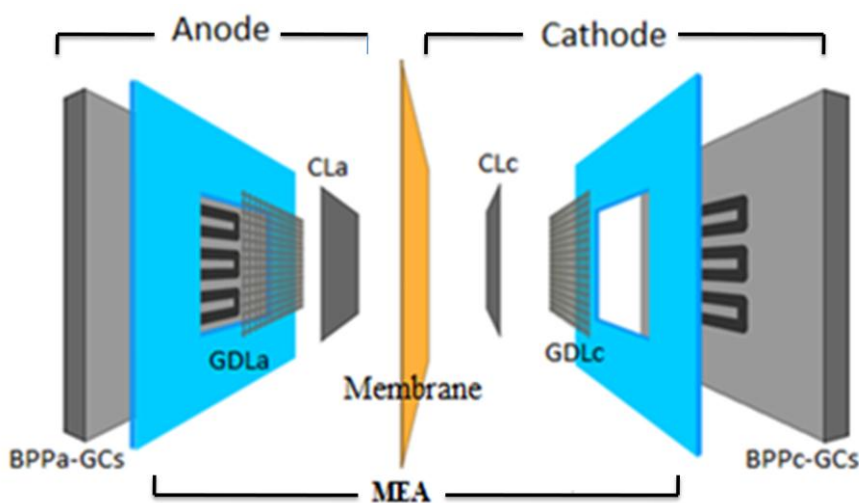
تنتج خلية وقود واحدة (unit cell) جهدا محدودا، وعادة ما يكون أقل من 1V. من أجل إنتاج جهد مفيد للتطبيقات العملية، يتم توصيل العديد من الخلايا في سلسلة لتشكيل مكمدس من الخلايا الوقودية (fuel cell stack) [12]، حيث يعتمد الجهد الكلي الناتج على عدد الخلايا في المكمدس. يعرض الشكل (3.I) خلية وقود PEM ومكمدسها.



الشكل (3.I): رسم توضيحي لمكمدس خلية وقود PEMFC [51].

1.3.I. وصف بنية PEMFC

هيكل خلية وقود PEM موضح في الشكل (4.I)، يوجد على جانبي الإلكتروليت (غشاء بوليمري) قطبان كهربائيان (أنود وكاتود) مساميان مصنوعان عادة من قماش الكربون أو ورق ألياف الكربون [14,13]. توجد على الواجهة بين القطب الكهربائي (أنود أو كاتود) والغشاء طبقة بها جزيئات محفزة تسمى طبقة المحفز (CL). تنتشر جزيئات O_2 و H_2 من قنوات تدفق الغاز (GCs) إلى طبقات المحفز بواسطة طبقات تسمى بطبقات انتشار الغاز (GDL). يطلق على التجميع متعدد الطبقات المكون من الغشاء و (CL) و (GDL) اسم تجميع القطب الكهربائي الغشائي (Membrane Electrode Assembly) [20]، حيث يوضع هذا التجميع بين الألواح الثنائية القطب (BPPs).



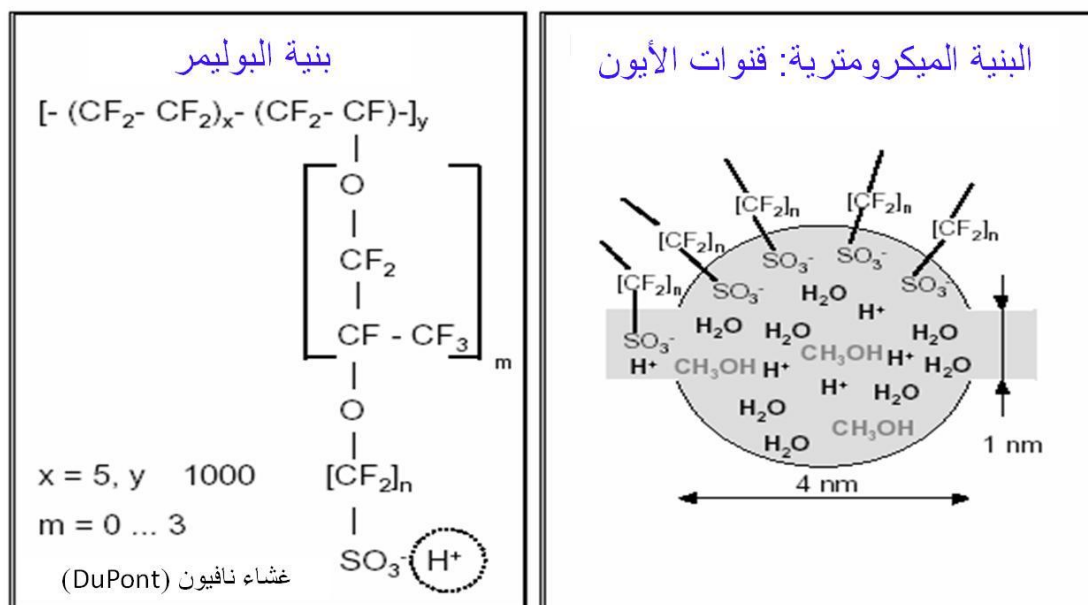
الشكل (4.I): المكونات الأساسية لخلية وقود PEM.

1.1.3.I. الغشاء (Membrane)

يعتبر الغشاء أحد العناصر الرئيسية لخلية PEMFC. يعتمد أداء الخلية بشكل كبير على خصائصه الميكانيكية والكهربائية والكيميائية، خاصة أنه يضمن فصل الأنود والكاتود. الغشاء عبارة عن هيكل مسامي يتراوح سمكه بين 20-200 ميكرون [52]، يعمل على فصل الغازين. تنتقل عبره البروتونات من الأنود نحو الكاتود، بينما يمنع مرور الإلكترونات لتنتقل نحو دارة خارجية وهذا أصل توليد الطاقة الكهربائية.

تعددت الأبحاث والتجارب على أغشية تضمن استقرار كيميائي وتعمل كدعم ميكانيكي للأقطاب الكهربائية. توصلت النتائج إلى أغشية بوليمرية (غشاء بلاستيكي رقيق جداً) ذات البنية المشبعة بالفلور (بوليمر حمض البيرفلورو كربون سلفونيك (PFSA)). حالياً، تعتبر عائلة (Nafion) التي تصنعها شركة (DuPont) أفضل مادة للغشاء [54,53]. يتكون بوليمر (Nafion) من هيكل عظمي من الكربون الفلوري المقاوم للماء وسلاسل جانبية لحمض السلفونيك المحبة للماء كما موضح في الشكل (5.I). تشكل السلاسل الجانبية المحبة للماء مجالات نانوية، حيث تنتقل البروتونات جزئياً عبر المجالات النانوية المتسربة فتسمح بدوران الماء وإعادة توجيهها بآلية التنقل لنقل البروتون. وتجدر الإشارة إلى أن الموصلية البروتونية للغشاء تعتمد بشدة على درجة حرارة التشغيل، وتوزيع وتركيز السلاسل الجانبية وحالة ترطيبها. تتمثل الخصائص الرئيسية المهمة لأغشية (Nafion) في [55]:

- حمضية وتشكل حامض مخفف عند ترطيبها.
- تمتص كميات كبيرة من الماء.
- تكون موصلات جيدة للبروتون (H^+) إذا كانت رطبة بشكل جيد.
- قوية ميكانيكياً (يمكن تشغيلها آلياً بحجم صغير يصل إلى 50 ميكرون).
- أغشية شديدة المقاومة للمواد الكيميائية.



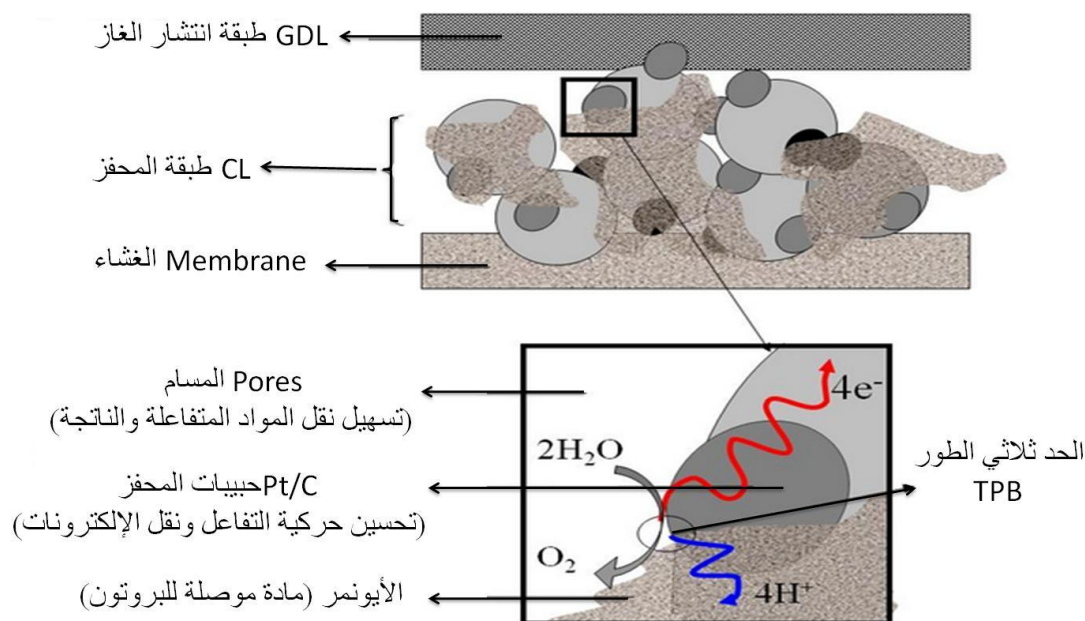
الشكل (5.I): بنية غشاء نافيون ذو المسامات المجهرية المشبعة بالماء [55].

من الضروري الحفاظ على رطوبة الغشاء بصورة معتدلة لتوصيل أيونات H^+ من الأنود إلى الكاتود بسهولة، لأن الماء الناتج أثناء التفاعلات الكهروكيميائية غير كافٍ للحفاظ على مستوى الرطوبة المطلوبة للغشاء. أيضاً، يمكن أن تؤدي الغازات المتفاعلة الجافة وتأثيرات السحب الكهروسموزي (electro-osmotic drag) الذي يجلب جزيئات الماء بالبروتونات التي تنتقل من الأنود إلى الكاتود) إلى حالة أقل رطوبة. وبالتالي فمن الأفضل ترطيب الغازات الداخلة قبل دخولها للخلية للحفاظ على مستوى رطوبة الغشاء، وذلك لتقليل متطلبات ترطيب الغشاء، أي لتقليل تكلفة النظام وحجمه وتعقيده [54,53].

2.1.3.I. طبقة المحفز (Catalyst Layer)

إن التفاعلات الكهروكيميائية التي تحدث في PEMFC تكون بطيئة بسبب انخفاض درجة حرارة التشغيل، لذلك وضعت طبقتان محفزتان على جانبي الغشاء لتحفيز التفاعلات الكهروكيميائية. تعتبر الطبقة المحفزة (CL) جزء أساسي في تطوير PEMFC وتسويقها، وتلبي بعض المتطلبات ك: الأداء العالي، تقليل التكلفة والمتانة العالية. حالياً، تُستخدم المعادن النبيلة كالبلاتين (Pt) بشكل شائع كمحفزات بسبب ثباتها الكيميائي الجيد وكثافة تيار التبادل العالية، ولكن نظراً لتكلفتها الباهظة وتسممها بسهولة، فإن البدائل ستكون مفيدة. لا يزال تطوير محفزات جديدة ذات حمل منخفض أو بدون (Pt) موضوعاً ذا أهمية علمية كبيرة. وبالتالي، لا يزال من الضروري إجراء المزيد من الدراسات العديدة والتجريبية لتحقيق هذا الهدف.

(CL) عبارة عن مجموعة من التكتلات التي تشكل شبكة مسامية، يبلغ حجم كل تكتل حوالي 200 نانومتر [56]. بنية (CL) موضحة في الشكل (6.I). تتكون من: جزيئات البلاتين مدعمة بالكربون (Pt/C)، وشبكة الأيونومر (بوليمر أيوني) والمسافات. يلعب كل مكون دوراً مهماً في العمليات الرئيسية التي تحدث داخل الخلية بأكملها، ابتداءً من انتشار الغازات في المسافات وفي الأيونومر، ومن نقل البروتون بواسطة الأيونومر والكربون ونقل الإلكترونات بواسطة الأيونومر والبلاتين، ومن امتصاص الماء الناتج بواسطة الأيونومر أو انتشاره على المسافات حتى انتقال الحرارة من موقع التفاعل نحو قنوات تدفق الغاز [57].



الشكل (6.I): رسم تفصيلي لبنية طبقة المحفز (CL) [58].

تجدر الإشارة إلى أن التفاعلات الكهروكيميائية (أكسدة الهيدروجين وإرجاع الأكسجين) تحدث عند الحد الثلاثي الطور (Three Phase Boundary) في طبقة المحفز، حيث يلتقي المحفز (C/Pt) والأيونومر والمتفاعلات [56]. لا يمكن تسهيل التفاعل الكهروكيميائي إن لم يكن معظم سطح المحفز متاحًا بشكل متزامن مع المتفاعلات والبروتونات والإلكترونات ومع قدرة جيدة لتحرير الماء الناتج. خلاف ذلك، يمكن أن تشغل المياه الناتجة السطح التفاعلي بشكل مفرط وتعرف هذه الظاهرة بتثبيح الخلية بالماء بشكل سيء، فتمنع نقل المادة المتفاعلة وهذا ما ينتج عنه حدوث خلل في (CL) فيؤدي إلى تدهور أداء الخلية. لذلك يجب أن يكون تصنيع طبقات (CLs) جيدًا: أن تكون نشطة كيميائيًا لتنشيط الأكسجين، تسهيل تحرير الماء الناتج منها، أن تكون مستقرة في ظل ظروف التشغيل المسببة للتآكل، تسهيل نقل المواد المتفاعلة والناتجة، وسهولة نقل الإلكترونات والبروتونات ونقل الحرارة [58].

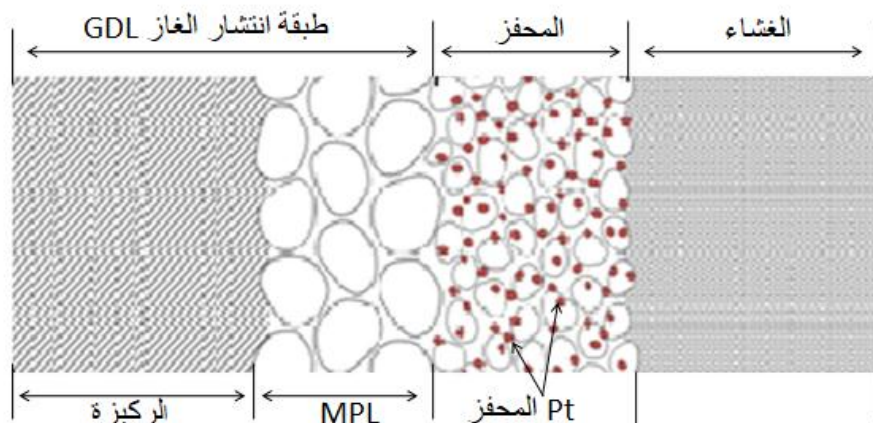
3.1.3.I. طبقة انتشار الغاز (Gas Diffusion Layer)

طبقة انتشار الغاز (GDL) في خلية وقود PEM محصورة بين طبقة المحفز (CL) واللوحه ثنائية القطب، يتحكم هيكلها في عمل المحفز والأداء الكلي للخلية، عبارة عن وسط مسامي يتكون من ألياف كربونية مصنوعة من مادة مقاومة للماء تظلي ببوليمر فلوري (عادة ما يتم استخدام بولي تيترا فلورو إيثيلين Poly Tetra Fluoro Ethylene) وتسمى بالركيزة (Substrat) [60,59].

على الرغم من أن (GDL) لا تساهم في عملية التفاعلات الكهروكيميائية بشكل مباشر، إلا أنها تمتلك عدّة وظائف مهمة تتمثل في [61,54]:

- تعمل كمسار لنقل الغازات (الهيدروجين والأكسجين) من قنوات مجال التدفق المحفورة في اللوحه ثنائية القطب إلى طبقة المحفز، مما يسمح لها بالوصول إلى المنطقة النشطة بأكملها (وليس فقط إلى تلك المجاورة للقنوات).
- تعمل كمسار لإزالة الماء الناتج من طبقة المحفز إلى قنوات مجال التدفق.
- تعمل كموصل للحرارة.
- تربط طبقة المحفز كهربائيًا باللوحه ثنائية القطب (تجميع التيار)، مما تسمح للإلكترونات بالانتقال إلى الدارة الكهربائية بسهولة.
- تعتبر دعامة ميكانيكية للغشاء وطبقات المحفز.

عند السطح البيئي (CL/GDL) في جهة الكاتود، يمكن أن تؤدي التفاعلات الكهروكيميائية (تلامس كربون GDL ومادة الغشاء والماء) إلى انبعاث غاز CO_2 و CO ، فنتأكسد (GDL) بسبب الهجمات الكيميائية وخاصة من بيروكسيد الهيدروجين، إن انتشار بيروكسيد الهيدروجين في (GDL) يمكن أن يؤدي إلى تحلل (PTFE). ينتج عن أكسدة الكربون وتحلل (PTFE) عدم مقاومة (GDL) للماء، ومع مرور الوقت تصبح الأقطاب الكهربائية أكثر عرضة للفيضان نظرًا لصعوبة تفرغ الماء [59,55]. في معظم الأحيان، يتم إضافة طبقة ذو مسامات صغيرة جدًا (MPL) على الركيزة تتكون من خليط أسود الكربون و (PTFE) تطبق على جهة المحفز كما في الشكل (7.I)، ويتمثل دورها في تجنب التدفق العكسي المحتمل لتكثيف الماء السائل في (GDL) نحو (CL)، وتحسين التوصيل الكهربائي بين هذين المكونين. يتم ضمان تجنب التدفق العكسي للماء بواسطة البوليمر الفلوري المطلي (PTFE) والحجم الصغير لمسام (MPL) مما يجعلها غير نفوذة للماء. الحجم الميكرومترى لمسام (MPL) مسؤول أيضًا عن الاتصال الكهربائي الجيد بين (GDL) و (CL) [55].



الشكل (7.I): مقطع عرضي تخطيطي لنموذج خلية PEMFC: تموضع (MPL) على (GDL) [62].

لكي تؤدي طبق، انتشار الغاز وظيفتها بشكل سليم حتى لا تؤثر سلباً على أداء الخلية يتطلب أن تكون: مسامية بما فيه الكفاية، موصلة كهربائياً وحرارياً، جامدة بما يكفي لدعم تركيبة جميع القطب الكهربائي الغشائي (MEA).

4.1.3.I الصفائح ثنائية القطب (Bipolar Plate)

حالياً، تشكل الصفائح ثنائية القطب معظم حجم ووزن مكبس PEMFC [63]. تسمى هذه الصفائح بصفائح ثنائية القطب لأنها تربط كاتود خلية بأنود الخلية المجاورة لها في المكبس، أو ثنائية التخصيد لأن مجاري الغاز محفورة على سطحها أي تفصل غازات الخلايا المتجاورة. كما نلخص دورها في [20,23]:

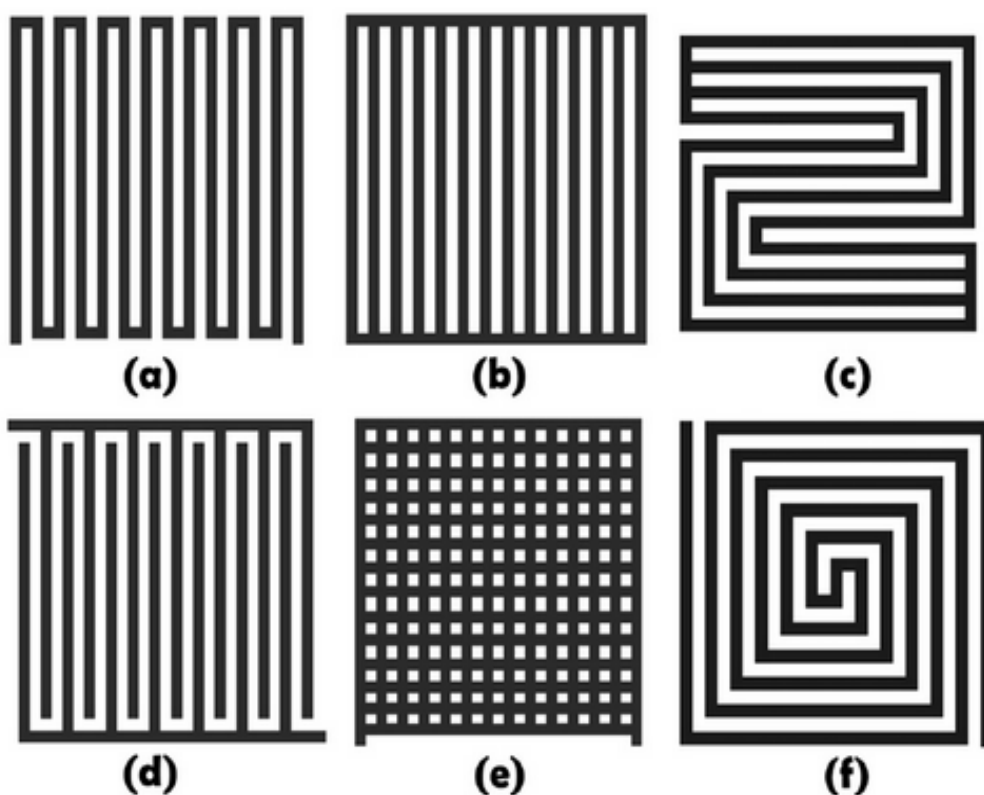
- تدعم خلايا المكبس ميكانيكياً، يجب أن تقاوم الخلية القيود الميكانيكية (قوة التثبيت) بينما تظل خفيفة قدر الإمكان لزيادة كثافة الطاقة.
- تجميع الإلكترونات من أنود خلية إلى كاتود الخلية المجاورة (التوصيل الكهربائي)، يجب أن تكون الموصلية الكهربائية للصفائح عالية قدر الإمكان، أعلى من $100\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.
- ضمان فصل الغازات المتفاعلة على كلا الجانبين، لذلك يجب أن تكون الصفائح غير منفذة للغاز.
- توفر (BPs) مسارات لتدفق الغازات المتفاعلة، والمعروفة أيضاً باسم قنوات تدفق الغاز (Channels Gas) أو مجالات التدفق.
- تغذية المواد المتفاعلة (الهيدروجين أو الأكسجين) من جانبي الصفيحة عبر القنوات إلى طبقات الانتشار.
- تبريد الحرارة من التفاعل الكهروكيميائي باتجاه قنوات التبريد يجب أن تكون الموصلية الحرارية للألواح عالية بما يكفي.
- تبريد المياه الناتجة عن التفاعل الكهروكيميائي والغازات غير المستخدمة.

بشكل عام، تصنع (BPs) الحالية من نوعين من المواد: الجرافيت أو المعادن. كان الجرافيت من أول المواد المستخدمة في صناعتها، حيث أظهر ثباتاً ممتازاً في ظل ظروف التشغيل (درجة الحرارة المرتفعة، التآكل،.....). خلاف ذلك، ستحفر على سطح اللوحة قنوات صغيرة نانومترية (minichannels) لإمداد الغاز غالباً ما تكون تكاليف تصنيعها على لوحة الجرافيت مرتفعة للغاية بالنسبة لتسويق خلايا الوقود. وذلك لأن طبيعة الجرافيت مسامية، مما يتطلب معالجات محددة لجعل الألواح غير نفوذة للغازات.

أيضاً، الصفائح المعدنية لها عيب كبير مقارنة بالجرافيت، سواء كانت مصنوعة من الألمنيوم أو التيتانيوم أو النيكل فهي معرضة للتآكل عند تعرضها للأكسجين والماء في درجات حرارة مرتفعة [20]. يزيد تآكل الصفيحة من مقاومتها الكهربائية، لهذا السبب اقترحت بعض الدراسات استخدام ألواح معدنية (لتقليل تكلفة الإنتاج، والتوصيل الكهربائي الجيد، وعدم نفاذ الغاز) وطلائها بطبقة رقيقة من الجرافيت (لتجنب التآكل)، وذلك لتحسين أداء الخلية [23].

في الأونة الأخيرة، تم بذل جهد كبير لاختيار مادة تصنيع الألواح و تصميم مجالات التدفق، حيث يوضح الشكل (8.I) تصميم مجالات التدفق الأكثر شيوعاً وتطبيقاً على الألواح. يلعب مجال التدفق أدوار حاسمة في أداء PEMFC تتمثل في [64]:

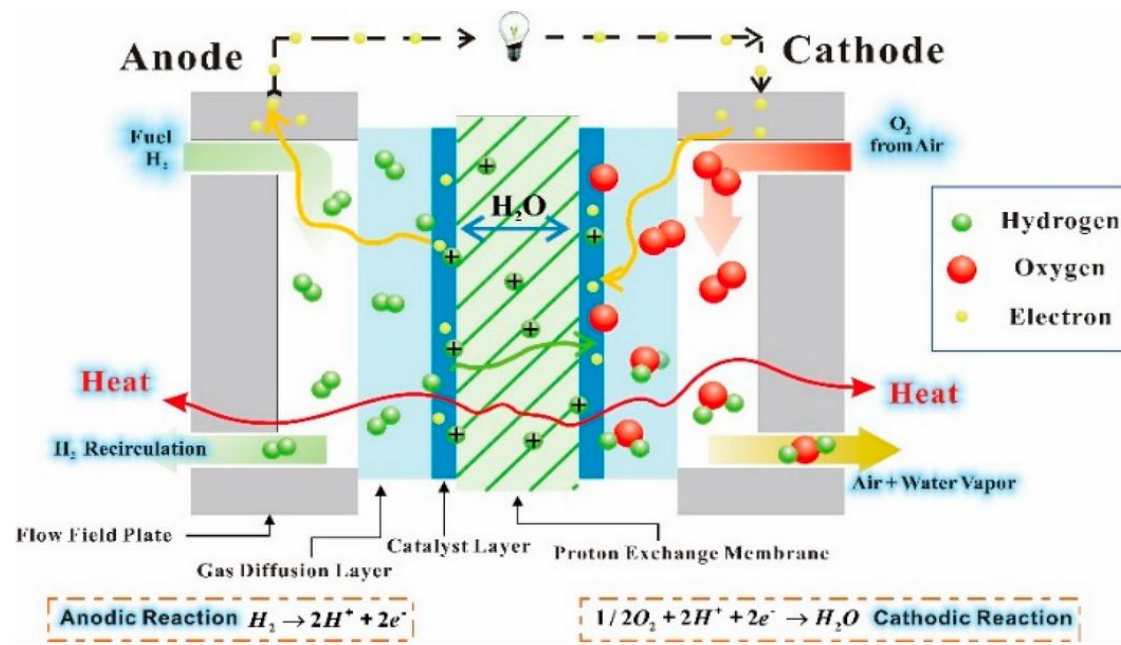
- توزيع الغازات المتفاعلة بشكل موحد على مواقع التفاعل لمنع تكون النقاط الساخنة (مناطق في الخلية ذات معدل تفاعل كيميائي عالي ينتج توليد المزيد من الحرارة). ومنع تشكل النقاط الباردة أيضاً حيث يوجد نقص في معدل التفاعل.
- يقوم حقل التدفق بتوصيل الغازات المتفاعلة إلى مواقع التفاعل، وينقل المنتجات بعيداً عن مواقع التفاعل وخارج الخلية، كما أن له تأثير كبير على التحكم في فيضانات المياه.
- تسهيل نقل الإلكترونات إلى الدارة الخارجية عن طريق توسيع مساحة الاتصال بين اللوحة ثنائية القطب وطبقة انتشار الغاز.
- تقليل انخفاض الضغط من المدخل إلى المخرج، وهذا مقياس لمقدار الجهد المطلوب لدفع الغازات المتفاعلة عبر النظام.



الشكل (8.I): تصميم الألواح ثنائية القطب: (a) serpentine سربنتيني، (b) parallel متوازي، (c) سربنتيني متوازي، (d) interdigitated متداخل، (e) grid شبكي، (f) spiral-serpentine سربنتيني حلزوني [65].

2.3.I. مبدأ عمل PEMFC

يعتمد مبدأ تشغيل خلية وقود غشاء التبادل البروتوني على التفاعلات الكهروكيميائية (تفاعل الهيدروجين والأكسجين لإنتاج الكهرباء)، الشكل (9.I) يوضح مبدأ عمل الخلية.



الشكل (9.I): مبدأ عمل PEMFC [17].

على جانب الأنود، يتدفق وقود الهيدروجين المرطب إلى قناة الغاز المحفورة في الألواح ثنائية القطب (BPP) وينتشر من خلال طبقة انتشار الغاز الأنودية (GDL) ليصل إلى الطبقة المحفزة الأنودية (CLa)، عند السطح البيني (غشاء/CLa) يحدث تفاعل أكسدة الهيدروجين. ينتج التفاعل إلكترونات e⁻ وبروتونات الهيدروجين H⁺، تتدفق e⁻ عبر (BPP) إلى دارة خارجية هنا يتم الحصول على الكهرباء (Electricity)، في حين تهجر البروتونات عبر الغشاء نحو الطبقة المحفزة الكاثودية (CLc).

على جانب الكاثود، يتدفق غاز الأكسجين في قنوات التدفق وينتشر إلى (CLc) بمساعدة طبقة انتشار الغاز الكاثودية (GDLc)، عند السطح البيني (غشاء/CLc) تتفاعل أيونات الهيدروجين H⁺ والإلكترونات الآتية من الدارة الخارجية مع الأكسجين (تفاعل إختزال الأكسجين) وبالتالي يكون الناتج ماء. ينتج عن تكوين الماء إطلاق حرارة (Heat) كمنتج ثانوي للعملية الشاملة.

نصف تفاعل أنود الخلية يوضح كالتالي:



نصف تفاعل كاثود الخلية يوضح كالتالي:



التفاعل الكهروكيميائي الكلي لخلية وقود PEM:



4.I أداء PEMFC

تهتم نمذجة خلية الوقود بفهم الخلية والتنبؤ بسلوكها (أدائها)، تشمل المعلمات التي يمكن التنبؤ بها التيار والجهد والاستطاعة وكفاءة الخلية.

1.4.I التيار الكهربائي الناتج

التفاعل الكيميائي الأساسي الحادث في خلية وقود PEM [66]:



يفقد كل جزيء هيدروجين إلكترونين ويحصل كل جزيء أكسجين على 4 إلكترونات، مما ينتج عن هذا التفاعل تيار كهربائي I (Amper) يقدر كالتالي [66]:

$$I = \frac{4 \cdot F \cdot \dot{m}_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} = \frac{2 \cdot F \cdot \dot{m}_{\text{H}_2}}{M_{\text{H}_2}} \quad (5. I)$$

حيث: F ثابت فراداي ($96485 \text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$)، \dot{m}_{O_2} ، \dot{m}_{H_2} معدل التدفق الكتلي للهيدروجين والأكسجين (g/s)، M_{H_2} الكتلة الجزيئية للهيدروجين وتساوي (2.016g/mol)، M_{O_2} الكتلة الجزيئية للأكسجين وتساوي (32g/mol).

التيار الفعلي الناتج أقل من هذا التيار، لأنه في الواقع لا يحدث استخدام كامل للأكسجين أو الهيدروجين. بشكل عام، عند تقدير التيار الناتج يتم أخذ معدل التدفق الكتلي للهيدروجين في الاعتبار، لأنه لا يتوفر إمداد محدود من الأكسجين لخلايا الوقود في الواقع [67].

2.4.I الجهد الكهربائي الناتج

يوجد العديد من الأسباب للاختلاف في الجهد الفعلي (الصافي) والجهد المثالي (المرجعي) لدارة مفتوحة عكوسة لخلية الوقود. يسمى هذا الاختلاف في الجهد بمصطلحات مختلفة تتضمن أسبابًا مختلفة له يسميها علماء الكيمياء الكهربائية الجهد الزائد الذي يعارض الجهد المثالي لخلية الوقود. ويسمى أيضًا الاستقطاب أو اللارجعة أو الضياعات [68].

1.2.4.I جهد الدارة المفتوحة (الجهد النظري)

من أجل تحديد كمية الطاقة المفيدة (الحرارية) التي يمكن استخلاصها من الهيدروجين يتم حساب المحتوى الحراري (الانتالبي) لتفاعل احتراق الهيدروجين ويسمى أيضًا بقيمة تسخين الهيدروجين. وهي كمية الحرارة التي قد تتولد عن الاحتراق الكامل لـ 1mol من الهيدروجين. انتالبي التفاعل الكيميائي هو الفرق بين انتالبي التكوين لكل مول من النواتج والمواد المتفاعلة نعبر عنه بالعلاقة [67]:

$$\Delta H = (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{\text{O}_2} \quad (6. I)$$

حيث: h_f تمثل انتالبي التكوين (enthalpy of formation) لكل مول من المادة

تبلغ حرارة تكوين الماء السائل (-285.8kJ/mol) و حرارة تكوين المتفاعلات صفرًا عند 25°C [66]. عند الشروط النظامية ($T^\circ=25^\circ\text{C}, P^\circ=1\text{atm}$) يكون الماء في صورة سائلة (بافتراض عدم وجود فائض من الأكسجين). من الضروري الإشارة إلى أنّ هناك أعلى قيمة لتسخين الهيدروجين (HHV) وأقل قيمة للتسخين (LHV)، ويعتمد الاختلاف على طور الماء الناتج. ولغرض هذا القسم تمّ النظر في (HHV) أي الماء في الطور السائل ($\Delta H^\circ=285.8\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$).

بسبب الانتروبي (ΔS) الناتجة في كل تفاعل كيميائي، هناك جزء من الأنتالبي لا يمكن تحويله إلى عمل مفيد (كهرباء). إنها طاقة جيبس الحرة (ΔG) للتفاعل، وهي الطاقة المتاحة عند درجة حرارة التحويل تكتب بالمعادلة التالية [69]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (7.I)$$

تكوين الانتروبي في نظام خلية الوقود يولد خسائر غير عكوسة في تحويل الطاقة، وهو الفرق بين انتروبي النواتج وانتروبي المتفاعلات، ويكتب على النحو التالي [67]:

$$\Delta S = (s)_{\text{H}_2\text{O}} - (s)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(s)_{\text{O}_2} \quad (8.I)$$

كما هو مذكور في المعادلة (7.I)، يتم الحصول على أقصى عمل كهربائي (W_{el}) في خلية وقود تعمل عند درجة حرارة وضغط ثابتين من خلال التغير في الطاقة الحرة لجيبس (ΔG) للتفاعل الكهروكيميائي. نعبر عن العمل الكهربائي بالعلاقة [69,66]:

$$W_{\text{elc}} = -nFE = (\Delta G) \quad (9.I)$$

حيث: n عدد الإلكترونات المشاركة في التفاعل (عند التفاعل الكلي في المعادلة (3.I) نجد $n=2$)، و F ثابت فاراداي، و E الجهد المثالي للخلية

إنّ التغير في أنتالبي الخلية يساوي (285.8kJ/mol) والتغير في الانتروبي (ΔS) يساوي ($-163.2\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$) على افتراض أن التفاعل يحدث في نفس درجة الحرارة (25°C). مع الأخذ في الاعتبار الخسائر غير عكوسة، من 285.8kJ/mol (أقصى قدر من الطاقة) يمكن تحويل 237.20 kJ/mol إلى طاقة كهربائية، ويتم تحويل 48.60 kJ/mol المتبقية إلى حرارة [66]. لذلك من المعادلة (9.I) يكون الجهد النظري العكوس لخلية الوقود PEM عند ($T^\circ=25^\circ\text{C}$) كالتالي:

$$E^\circ = \frac{-\Delta G^\circ}{nF} = \frac{237200\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}}{2 \times 96485\text{ C/mol}} = 1.23\text{ Volts} \quad (10.I)$$

بشكل عام، تكون درجة حرارة التشغيل والضغط في المكسد أعلى من تلك التي تفرضها الظروف القياسية. لذلك يتم التعبير على درجة الحرارة والضغط باعتماد طاقة جيبس الحرة من خلال المعادلات التالية [70]:

$$\Delta G(T, P^\circ) = \Delta G^\circ + \Delta S^\circ(T - T^\circ) \quad (11.I)$$

$$\Delta G(T^\circ, P) = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0.5}} \quad (12.I)$$

حيث: $\Delta G(T, P^\circ)$ تغير طاقة الحرة لجيبس عند ضغط ثابت قياسي (1 atm) ودرجة حرارة متغيرة $\Delta G(T^\circ, P)$ لتغير طاقة الحرة لجيبس عند درجة حرارة ثابتة قياسية (25°C) وضغط متغير، R ثابت الغاز a_{H_2O} تمثل النشاط (الرطوبة النسبية لبخار الماء أي نسبة ضغط البخار إلى ضغط التشبع $a_{H_2O} = P_{H_2O}/P_{sat}$)، و P_{H_2} و P_{O_2} الضغوط الجزئية لغاز الأكسجين في الكاتود والهيدروجين في الأنود على الترتيب.

يتم إعطاء الجهد النظري الديناميكي كدالة لدرجة الحرارة والضغط بواسطة [70]:

$$E(T, P^\circ) = -\frac{\Delta G^\circ}{2F} - \frac{\Delta S^\circ}{2F} (T - T^\circ) \quad (13.I)$$

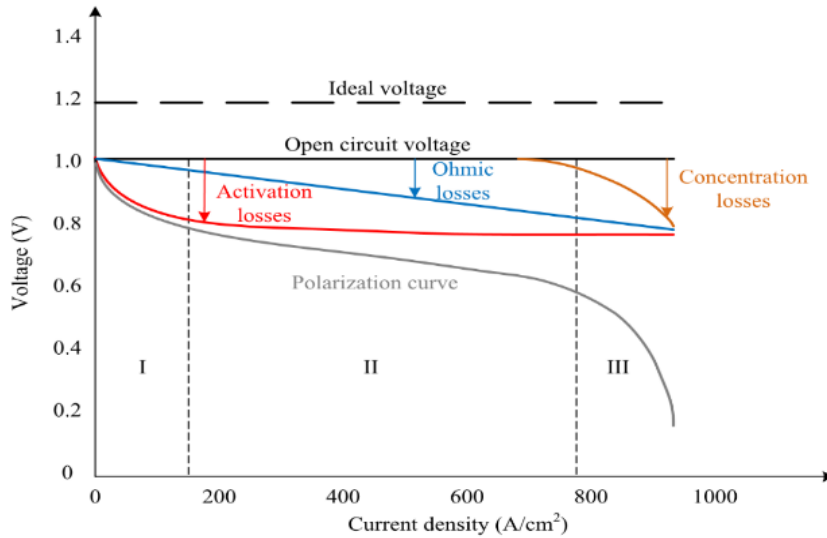
$$E(T^\circ, P) = -\frac{\Delta G^\circ}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}} \quad (14.I)$$

يكون الماء في الطور السائل عندما يصل الضغط الجزئي للبخار إلى ضغط التشبع أي $(a_{H_2O} = 1)$ ومنه يكون الجهد المثالي (والذي يمثل الجهد الأقصى التخيلي لخلية الوقود بافتراض أن كل التغير في المحتوى الحراري للتفاعلات قد تم تحويله إلى طاقة كهربائية) كدالة لدرجة الحرارة والضغط للتفاعل الكلي (4.I) لخلية الوقود PEM معبر عنه بمعادلة نرنست (Nernst) كالتالي:

$$E_{T,P} = E^\circ - \frac{\Delta S^\circ}{2F} (T - T^\circ) + \frac{RT}{2F} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}) \quad (15.I)$$

2.2.4.I. ظاهرة الاستقطاب (Polarisation phenomenon)

عند تحميل (Load) خلية الوقود ينخفض جهد العمل ليصل إلى 70% أو 60% من جهد الدارة المفتوحة (جهد نرنست) و يحدث ضياعات (Losses) في الطاقة، وتتشكل هذه الضياعات من ثلاثة مصادر موضحة في الشكل (10.I) وهي:



الشكل (10.I): منحنى الاستقطاب مع مختلف الجهود الزائدة [71].

1.2.2.4.I. الاستقطاب الناجم عن التنشيط (activation loss)

يرتبط هذا النوع من الضياع بحركية التفاعلات البطيئة عند القطبين، أي أنه يتطلب جهد لبدء التفاعل الكهروكيميائي. تحدث هذه الخسائر في كل من الأنود والكاتود [68]، لكن في القطب الكاثودي أكثر وذلك راجع لتفاعل إرجاع الأكسجين يتطلب جهوداً عالية جداً، لأنه تفاعل أبطأ بكثير من تفاعل أكسدة الهيدروجين التي تحدث عند القطب الأنودي. توجد طريقة بسيطة للتعبير عن ضياع التنشيط وهي من خلال معادلة تافل (Tafel) [69,20]:

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (16. I)$$

حيث: α معامل نقل الشحنة للتفاعل عند القطب (أنود أو كاتود) يحدد تجريبياً حسب PEMFC المطبقة، i_0 كثافة التيار التي يبدأ عندها الجهد الزائد في التحرك من الصفر (تسمى كثافة تيار التبادل)، T درجة حرارة الخلية، R ثابت الغاز و F ثابت فاراداي.

2.2.2.4.I. الاستقطاب الناجم عن المقاومة الأومية (ohmic loss)

الضياع الأومي عبارة عن خسائر في جهد الخلية بسبب مقاومة الأقطاب لتدفق الإلكترونات ومقاومة الالكتروليت لتدفق الأيونات [67]. نظراً لأن كلا من أقطاب الخلية والالكتروليت تخضع لقانون أوم، يمكن التعبير عن الضياع الأومي بالمعادلة [69,20]:

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (17. I)$$

حيث: i هو التيار المتدفق عبر الخلية (A/cm^2)، و R_{ohm} المقاومة الداخلية للخلية (Ω) وتشمل غالباً المقاومة الأيونية والإلكترونية.

يتم الحصول على المقاومة الكلية من خلال النظر في مقاومة الغشاء باعتبارها أكثر أهمية مقارنة بمقاومة الأقطاب الكهربائية. تعتمد مقاومة الغشاء على رطوبة الخلية، أي أنّ الخسائر الأومية تختلف باختلاف الرطوبة في الغشاء. يمكن تقليل هذه الخسائر باستخدام أغشية ذات موصلية أيونية عالية وأقطاب كهربائية ذات موصلية إلكترونية عالية، أو عن طريق تقليل سمك الغشاء ودراسة رطوبته جيداً [67].

3.2.2.4.I. الاستقطاب الناجم عن التركيز (concentration loss)

عند استهلاك المادة المتفاعلة على مستوى السطح البيني (قطب/غشاء) بواسطة التفاعلات الكهروكيميائية، يحدث فقد في الجهد بسبب عدم قدرة حفاظ المادة المحيطة على التركيز الأولي (أي يحدث تدرج تركيز عند نقل الكتلة)، حيث يحدث هذا الضياع عادة عند كثافات تيار عالية. يعد النقل البطيء للمواد المتفاعلة أو المنتجة من أو إلى موقع التفاعل الكهروكيميائي مساهماً رئيسياً في استقطاب التركيز [20] لذلك يمكن التقليل من هذه الخسائر عن طريق زيادة تركيز المواد المتفاعلة وزيادة معدل تدفقها أو ضغطها، أو عن طريق تحسين بنية ومسامية (GDL). نعبّر عن ضياع التركيز بـ [69,20]:

$$V_{con} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (18. I)$$

حيث: i_L التيار المحدد وهو كثافة التيار التي يتم الوصول إليها عند استهلاك المادة المتفاعلة بشكل أسرع عند وصولها إلى السطح. لا يمكن لخلية الوقود أن تنتج أكثر من التيار المحدد لأنه لا توجد مواد متفاعلة على سطح المحفز.

3.2.4.I. الجهد الفعلي (الصافي)

يتم الحصول على الجهد الفعلي من خلال الفرق بين الجهود المثالية (العكوسة) والجهود الزائدة (الضياع) بالمعادلة التالية:

$$V_{cell} = E_{T,P} - \sum V_{losses} \quad (19. I)$$

حيث: $\sum V_{losses}$ مجموع الجهود الزائدة، $E_{T,P}$ الجهد النظري (الديناميكي الحراري)، و V_{cell} الجهد الفعلي المنتج لخلية PEM

بتعويض المعادلات السابقة يكتب التوتر الفعلي للخلية على الشكل الآتي [33,20]:

$$V_{cell} = E_{T,P} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - iR_{ohm} - \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (20. I)$$

3.4.I. استطاعة خلية الوقود (Power)

يتم تقدير استطاعة الخلية الوقودية من المعادلة التالية [33]:

$$P = V_{cell} \times i \times A = V_{cell} \times I \quad (21. I)$$

حيث: i التيار الكهربائي المنتج فيسطح القطب للخلية بـ (A/cm^2) ، A سطح القطب الكهربائي (cm^2) ، V_{cell} التوتر الفعلي للخلية بـ (Volt).

4.4.I. كفاءة الخلية (Efficiency)

يمكن تقييم كفاءة أي جهاز تحويل طاقي عن طريق نسبة طاقة الإخراج إلى طاقة الإدخال. يمكن تمثيل طاقة الإخراج (output) في خلايا وقود PEM بالعمل الكهربائي (حاصل ضرب التيار I) بجهد الخلية (V_{cell})

$$P_{output} = V_{cell} \cdot I \quad (22. I)$$

ويمكن تمثيل الطاقة المدخلة (input) من خلال قيمة تسخين الهيدروجين ΔH (حاصل ضرب القيمة الأعلى التسخين الهيدروجين $HHV(j/g)$ بمعدل التدفق الكتلي للهيدروجين $\dot{m}_{H_2} (g/s)$ وهذا بافتراض أن طبيعة الماء الناتج سائلة). أي كفاءة خلية وقود PEM تتمثل في نسبة مخرجات الطاقة الكهربائية لمدخلات الوقود ونعبر عنها بـ [72]:

$$\eta = \frac{P_{output}}{(\dot{m}_{H_2} \cdot HHV)_{input}} \quad (23. I)$$

بتعويض علاقة التيار بالتدفق الكتلي للهيدروجين من المعادلة (5.I) تصبح الكفاءة كما يلي [72]:

$$\eta = \frac{2V_{\text{cell}}F}{2.016 * HHV} \quad (24.I)$$

بطريقة بسيطة، كفاءة الخلية الوقودية PEM تتمثل في نسبة جهد التشغيل الفعلي إلى الجهد المثالي نعبر عنها بالمعادلة الأكثر استخداماً في الدراسات [73]:

$$\eta = \frac{I \cdot V_{\text{cell}}}{I \cdot E_{T,P}} \% = \frac{V_{\text{cell}}}{E_{T,P}} \% \quad (25.I)$$

حيث: $E_{T,P}$ التوتر المثالي للخلية، و V_{cell} التوتر الفعلي للخلية بـ (Volt)

5.I مصادر الحرارة في PEMFC

تعتبر النمذجة الحرارية ذات أهمية كبيرة لتحسين الأداء الكهربائي لخلايا الوقود الهيدروجينية أن تأثير درجة الحرارة على جهد خلية الوقود ليس ضئيل، كما هو موضح في العديد من المراجع [39]. في الواقع، تعتمد عمليات نقل الكتلة والشحنة بشكل كبير على درجة الحرارة. كما يعتمد النقل الحراري أيضاً على نقل الكتلة والشحنة. وبالتالي، تشكل النماذج الحرارية عاملاً رئيسياً لفهم السلوك الكهربائي لخلايا الوقود.

يتم التحكم في مصادر الحرارة بواسطة آليات توليد مختلفة: اللارجعة، الديناميكية الحرارية، حركية القطب، الخسائر الأومية وخسائر نقل الكتلة. بشكل عام، يمكن تصنيفها في:

1.5.I أنتروبي التفاعلات النصفية (تأثير بالتر Peltier effect)

يحدث في طبقات المحفز تسخين قابل للانعكاس بسبب تغير الانتروبي (ΔS) أثناء فترة التفاعلات النصفية، نعبر عن حرارة التفاعلات النصفية بالعلاقة [50]:

$$q_{\text{rec}} = -T\Delta S(T, P) \quad (26.I)$$

قدّر العديد من المؤلفين والباحثين قيمة تغير أنتروبي التفاعلات النصفية، حيث أشار المرجع [39] إلى أن انتروبي الأنود يساوي ($-226\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) أي تفاعل أكسدة الهيدروجين ماص للحرارة، وانتروبي الكاتود يساوي ($+62.8\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) أي تفاعل اختزال الأكسجين طارد للحرارة بنسبة عالية. كما أشار إلى أن انتروبي التفاعلات النصفية تمثل حوالي 30% من الحرارة الكلية المتولدة عند $(0.6\text{V}, 0.8\text{A}/\text{cm}^2, 80^\circ\text{C})$.

2.5.I التنشيط الكهروكيميائي للمتفاعلات

إن الجهود الزائدة التي تحدث في خلية الوقود نتيجة لعدم رجوع التفاعلات (التفاعلات الكهروكيميائية) هي المسؤولة عن جزء من تدهور الطاقة، تؤدي حالات عدم الانعكاس هذه إلى زيادة الجهد عند الأقطاب الكهربائية. يمكن كتابة مصدر الحرارة الناتجة بسبب اللارجعية للمتفاعلات بـ [50]:

$$q_{\text{act}}^a = -V_{\text{act}}^a i \quad ; \quad q_{\text{act}}^c = V_{\text{act}}^c i \quad (27.I)$$

حيث: i كثافة التيار المتدفق، V_{act}^c و V_{act}^a الجهد الزائد الأنودي والكاثودي غالبًا ما يتم حسابه من معادلة تافل (Tafel).

3.5.I حرارة امتصاص/امتزاز الماء (sorption/desorption)

عند المحفز تحدث أيضًا ظاهرة امتصاص الماء. بصورة خاصة، عندما يكون الماء في الطور السائل يحدث له امتصاص في الغشاء، و عندما يكون في طور البخار يحدث له امتزاز في مسام طبقات المحفز (CLs) أي يحدث له تراكم على سطح المسام. أثناء هذه العملية يتم إطلاق حرارة تقدر بـ [39]:

$$q_{sorp} = n_{H_2O} \Delta H_{l \leftrightarrow v}(T) \quad (27.I)$$

حيث: $\Delta H_{l \leftrightarrow v}(T)$ هو المحتوى الحراري (الانتاليبي) لتغيير طور الماء بين مرحلتي السائل والبخار و n_{H_2O} هو تدفق الماء المتغير الطور.

يمكن تقدير تدفق الماء عند الأسطح البيئية (غشاء/GDLs) وفقًا لأي وصف لنقل الكتلة في التجميع قطب غشاء (MEA)، يكون هذا التدفق عموديًا على الغشاء ويتم حسابه جبريًا، مما يسمح بمعالجة الامتصاص والامتزاز بنفس الطريقة [39].

4.5.I حرارة تغير الطور للماء

يمكن أن يحدث تغير في الطور للماء في جميع مكونات (MEA). يتم تحديد تغير الطور (موقع التكثيف) من خلال التوازن بين الضغط الجزئي للبخار ودرجة الحرارة. بشكل عام، قد يحدث تكثف الماء في المناطق التي تنخفض فيها درجة الحرارة (السطح البيئي GCs/GDL) بينما قد يحدث تبخر الماء في المناطق التي ترتفع فيها درجة الحرارة (بالقرب من الغشاء).

بمجرد تحديد مواقع التكثيف، يمكن بسهولة حساب مصدر الحرارة المرتبطة بها من الحرارة الكامنة للماء عند درجة حرارة معينة. يتم التعبير عن مصدر الحرارة المحلية المرتبطة بتكثيف أو تبخر الماء بالمعادلة [39]:

$$q_{c/v} = n_{v \rightarrow l} L_v \quad (29.I)$$

حيث: $n_{v \rightarrow l}$ كمية الماء المراد تكثيفها يتم حسابها جبريًا تكون موجبة عند حدوث تكثيف وسالبة عند حدوث تبخر، L_v الحرارة الكامنة للماء تساوي (41.6 kJ.mol^{-1}) عند 80°C .

5.5.I تأثير جول (Joule effect)

في جميع مكونات جميع القطب الكهربائي الغشائي (MEA) والصفائح ثنائية القطب، قد يحدث تسخين أومي بسبب مقاومة المواد لنقل الشحنة. يتم التعبير عن الحرارة الناتجة عن تأثير جول بـ [50]:

$$q_J = \frac{i^2}{\sigma} \quad (30.I)$$

حيث: σ الناقلية الكهربائية للمادة (S/m)، غالبًا ما يتم إهمال المقاومة الكهربائية لـ (GDLs) و (BPPs) بسبب الموصلية العالية لهذه المواد الكربونية [39].

6.I. خلاصة

في هذا الفصل، قمنا بعمل وصف عام لأنواع مختلفة من خلايا الوقود مع خصائصها ومجالات تطبيقاتها. كانت خلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC موضوع هذا العمل. تم وصف دقيق لهيكل الخلية لأجل فهم عملية التشغيل الشاملة. كما وضّحنا أداء الخلية المتمثل في التيار والجهد الكهربائي والكفاءة الطاقوية وذلك بتحليل ديناميكي حراري وكهروكيميائي. انهينا هذا الفصل بتوضيح مصادر الحرارة في الخلية وتأثيرها على الأداء الكلي، وذلك لأن هذا العمل يتمثل في دراسة إزالة الحرارة الزائدة من الخلية لتحسين الأداء والمحافظة على جميع مكونات الخلية من التدهور. في الفصل الموالي سنقوم بجمع معلومات مرجعية حول عملية تبريد PEMFC بطريقة التبريد بالسائل النانوي وتأثير تصميم قنوات تدفق السائل على أداء الخلية.

الفصل الثاني

دراسة مرجعية حول تبريد

خلية PEMFC

1.II. مقدمة

خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) عبارة عن جهاز كهروكيميائي يعمل على أساس تفاعل (O_2) و (H_2) لإنتاج الكهرباء كمنتج أولي، والماء والحرارة كمنتج ثانوي. إن الحرارة المتولدة والتي تشمل: الحرارة الانتروبية، الحرارة غير العكوسة من التفاعلات الكهروكيميائية، تسخين جول بالكهرباء من المقاومة الأيونية، والحرارة الناشئة عن تبخير وتكثيف الماء، غالبًا ما تكون أكبر من الطاقة الكهربائية الناتجة في الخلية. إذا لم يتم إزالة الحرارة الزائدة سترتفع درجة حرارة الخلية ويصبح توزيعها غير موحد فتؤثر مباشرةً بشكل سلبي على الأداء، لذلك وُجب إدارة الحرارة في الخلية [76,75,74].

يعد التبريد الفعال مهمًا للتأكد من أن PEMFC آمنة وتعمل بكفاءة جيّدة، خاصة عندما يتعلق الأمر بمكدسات السعات العالية. ومع ذلك، لا تزال هناك بعض المشكلات في الإدارة الحرارية والتي تحتاج إلى البحث عن حلول حاسمة نظرًا لحساسية الغشاء كأحد المكونات الحيوية في التشغيل [77]. في جانب تعزيز الإدارة الحرارية، يسعى العديد من الباحثين في الوقت الحاضر إلى محاولات تصغير نظام التبريد لجعل PEMFC أكثر جاذبية للتسويق [74]. ومن بين التطورات تحسين تصميم مجال التدفق وتعزيز معامل نقل الحرارة لوسط التبريد.

في هذا الفصل نقدم بعض الدراسات المرجعية التي تتمحور حول تأثير درجة الحرارة على خلية وقود غشاء التبادل البروتوني، والطرق الشائعة لإزالة الحرارة الزائدة. من بين الدراسات الأكثر أهمية، نجد تلك المعتمدة على طريقة التبريد بالسائل، حيث نركز على تصميم قنوات تدفق السوائل التي تمت دراستها حديثًا، كما نركز على استخدامات السائل النانوي في نظام تبريد PEMFC نظرًا لموصليته الحرارية الفاتحة مقارنةً بالسوائل التقليدية.

2.II. تأثير درجة الحرارة على أداء PEMFC

تعد درجة الحرارة معلمة بالغة الأهمية لأداء PEMFC والتي تؤثر بشكل مباشر أو غير مباشر على حركية التفاعل، ونقل الماء، ومستوى الرطوبة، وتوصيل الغشاء، وتحمل المحفز، وإزالة الحرارة، والضغط الحراري في الغشاء وما إلى ذلك. لا يمكن التنبؤ ببساطة تأثير درجة حرارة التشغيل على كفاءة الخلية [22]. نظرًا لأن درجة الحرارة تظهر بشكل صريح وضمني في كل خسارة جهد، يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تدهور الغشاء وتلف جميع مكونات الخلية، بينما تؤدي درجات الحرارة المنخفضة إلى تقليل حركية التفاعل الكهروكيميائي، وتسبب في بعض الأحيان مشكلة فيضان الماء، مما يؤدي إلى ضعف الأداء [75,19].

إن ارتفاع درجة الحرارة يؤثر سلباً على الكفاءة، وذلك بسبب تناقص الجهد الديناميكي وزيادة الضياعات. لكن من ناحية أخرى، ارتفاعها له تأثير إيجابي على كثافة التيار، والموصلية الأيونية وخصائص نقل الكتلة. تم تحديد دور ارتفاع درجة الحرارة في خلايا PEMFC بواسطة Zhang et al [18] مما أدى إلى تطوير خلايا وقود PEM ذات درجة الحرارة العالية.

أيضاً Song et al [78] قام بالتحقيق بشكل تجريبي في أداء خلية PEMFC المعتمدة على غشاء (Nafion® 112). توصل إلى أن الأداء يزداد كلما زادت درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة إلى 80°C، وزيادة أكثر تؤدي إلى اعتماد الأداء على كثافة التيار، أي أنه عند كثافة تيار منخفضة

(أقل من 0.4 A/cm^2) تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تدهور الأداء بينما عند كثافات تيار عالية (أكبر من 0.4 A/cm^2) تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تحسن الأداء. وقد لوحظ أفضل أداء عند حوالي 80°C مع ضغط يبلغ 3bar ورطوبة نسبية 100%.

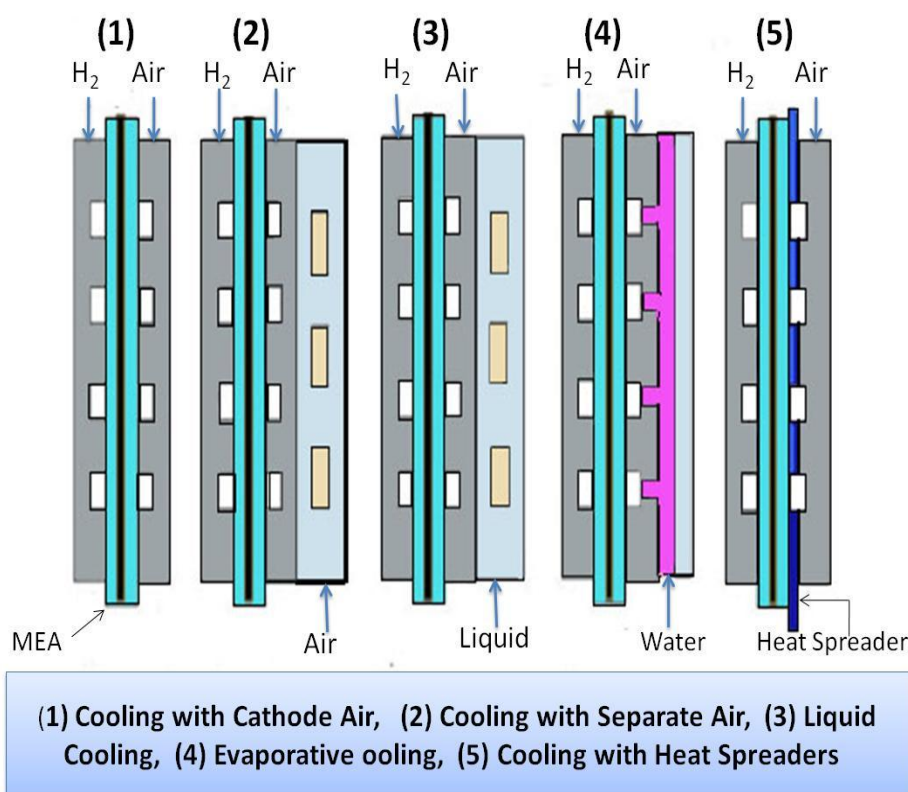
Bujlo et al [79] طوّروا مكّس PEMFC ذو الكاتود المفتوح مكون من 10 خلايا. قام بقياس درجة الحرارة على سطح المكّس وجهد خلية واحدة للتحقق من الأداء. لاحظ اختلاف كبير في درجات الحرارة على الصفائح الثنائية القطب المختلفة، حيث توجد مناطق ساخنة واضحة على سطح المكّس، من هنا استنتج أنّ التوزيع غير المتساوي في درجة حرارة المكّس يؤثر بشكل مباشر على إدارة الماء والجهد في الخلية. ولكن مع ذلك، ذكر أن زيادة درجة حرارة المكّس تؤدي إلى تسريع معدل التفاعل الكهروكيميائي وتحسين أداء الإخراج، لكن ارتفاعها المفرط قد يؤدي إلى جفاف الغشاء وتدهور المحفز.

وفي الدراسة التي أجراها Nanadegani et al [76]، وُضّح أنّه إذا لم يتم إزالة الحرارة الناتجة في PEMFC في الوقت المناسب ستسبب في ارتفاع درجة حرارة التشغيل، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في الأداء وحتى تلف لا يمكن إصلاحه. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤدي الاختلافات المفرطة في درجات الحرارة إلى تسخين غير متساو للغشاء.

ركز التقدم الأخير في خلايا الوقود على تطوير خلايا PEMFC التي تعمل عند درجة حرارة تشغيل تصل إلى 200°C . وذلك بسبب ميزاتها المقنعة للعمل [22]؛ حيث يتم تعزيز حركية القطب لتفاعل اختزال الأكسجين وتفاعل أكسدة الهيدروجين، يمكن تبسيط إدارة المياه لأنه لا يلزم النظر إلا في حالة طور ثابت للماء، يتم تبسيط نظام التبريد بسبب زيادة التدرج في درجة الحرارة بين خلايا المكّس والمبرد، يمكن استعادة الحرارة المهدرة كمصدر عملي للطاقة، تحمّل ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير مما يسمح لخلايا الوقود باستخدام الهيدروجين المصلح ذي الجودة الأقل.

3.II. نظام التبريد

تعد إدارة الحرارة والمياه في مكّسات PEMFC من أكثر القضايا صعوبة في تنفيذها في مختلف المركبات. في الواقع، لا يمكن إلا لنظام التبريد إدارة حرارة مكّس PEMFC. يوجد العديد من الطرق التي يمكن من خلالها تبريد مكّسات PEMFC، وذلك اعتمادًا على خصائص المكّس والغرض من الاستخدام. يوضح الشكل (1.II) بعض طرق التبريد الشائعة الاستخدام.



الشكل (1.11): رسم تخطيطي لطرق التبريد المختلفة لخلية الوقود PEM [22].

1.3.II. التبريد بتدفق هواء الكاتود

تجمع طريقة التبريد بهواء الكاتود بين قنوات الكاتود والتبريد. يعمل الهواء الوارد كمؤكسد للمشاركة في التفاعل الكهروكيميائي وكمبرد، حيث يبديد الحرارة من النظام، لذلك لا حاجة إلى قنوات تبريد إضافية. [80]De et al اعتمد طريقة ضبط تدفق الهواء ودرجة الحرارة، توصل إلى أن هذه الطريقة تزيد من كثافة تيار المكسد وتقلل من حجمه، كما توصل إلى أنه يجب عليه التحكم في درجة حرارة الخلية وذلك عن طريق ضبط معدل تدفق الهواء، لكنه وجد من الصعب التحكم الدقيق في درجة الحرارة.

2.3.II. التبريد بتدفق هواء منفصل

يفصل التبريد بهواء منفصل قناة تدفق الكاتود عن قناة تدفق التبريد، حيث يتم إمداد هواء التبريد بشكل منفصل للتحكم في درجة حرارة المكسد. [81] Dicks et al صمم قناة تبريد منفصلة، واستخدام مراوح كطاقة مستمرة. وأظهرت النتائج أنه على الرغم من تعقيد النظام وتولد طاقة طفيلية إضافية، إلا أنه يمكن التحكم في درجة الحرارة نسبياً. كما أظهرت أبحاثه أن زيادة مساحة قناة التبريد يمكن أن تحقق توزيعاً أكثر انتظاماً لدرجة الحرارة.

3.3.II. التبريد بتدفق سائل مبرد

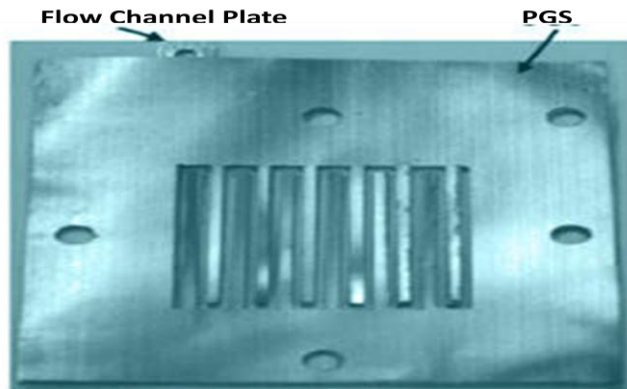
أيضاً، في هذه الطريقة تفصل كل من قنوات الكاتود والأنود عن قنوات سائل التبريد في الألواح ثنائية القطب، أو تحفر قنوات في ألواح إضافية تصنع عادة من الجرافيت تسمى بألواح التبريد، يتم ترتيبها بين كل خليتين أو بين مجموعة من الخلايا. يكون سائل التبريد عبارة عن ماء منزوع الأيونات، أو مبرد مضاد للتجمد كالمسائل النانوية. تتمتع الوسائط السائلة بقدرة حرارية أعلى من الوسائط الغازية، لذلك عندما تكون قوة المكس عالية، ومتطلبات تبديد الحرارة كبيرة، فإن استخدام التبريد السائل غالباً ما يكون له تأثير أفضل في تبديد الحرارة. عادةً ما يتم التحكم في درجة الحرارة باستخدام التبريد السائل عن طريق ضبط قنوات التبريد وتحسين اختيار سائل التبريد والتحكم في تدفقه.

4.3.II. التبريد بالتبخير (التبريد مع تغيير الطور)

يتم استخدام المحتوى الحراري لتبخير الماء في التبريد عن طريق حقن ماء إضافي في التيارات المتفاعلة للخلية. يأخذ الماء الحرارة المتولدة في الأقطاب الكهربائية فيحدث تغيير طوره مع ثبوت درجة الحرارة، وتساعد هذه الطريقة في منع جفاف الغشاء. درس F. Barbir [20] تأثير معاملات التشغيل على معدل حقن الماء عند الكاتود لتبريد المكسبات بالتبخير، وأظهرت النتائج أنه عند التحميل العالي تزداد الحاجة إلى حقن الماء لتحقيق ظروف التشبع عند المخرج وذلك لتوفير تبريد كافي. وجد Fly and Thring [82] أنه في ظل نفس ظروف العمل يمكن تقليل حجم المبرد الذي يستخدم التبريد بتغيير الطور بحوالي 27% مقارنة بمبرد التبريد بالسائل، مما يؤدي إلى تقليل حجم نظام التبريد في الخلية أي تحسن الأداء.

5.3.II. التبريد باستخدام موزعات الحرارة

الموزعات الحرارية عبارة عن مواد عالية التوصيل توضع على لوحة قناة التدفق، كما هو موضح في الشكل (2.II) لغرض التبريد. في هذه الطريقة، يتم أولاً نقل الحرارة من خلال التوصيل ثم تبديد الحرارة إلى الهواء المحيط من خلال الحمل الحراري الطبيعي أو القسري. في المكسبات كبيرة الحجم، يمكن أن يؤدي استخدام الموزعات إلى تقليل حجم نظام التبريد. C.Y.Wen et al [83] استخدم صفائح الجرافيت الموصلة حرارياً Pyrolytic Graphite Sheet موضحة في الشكل (2.II) كموزع للحرارة في خلية واحدة وفي مكس ذو 10 خلايا بشكل تجريبي. أظهرت النتائج أن الطاقة القصوى لمجموعة الخلايا العشرة زادت بنسبة 15% بعد استخدام 5 وحدات من (PGS) على جانب الكاتود من لوحة التدفق.



الشكل (2.II): صفيحة جرافيت موصلة حرارياً (PGS) منطبقة على لوحة قناة التدفق السربنتينية [83].

تعد الطاقة الناتجة (P_{out}) لخلية الوقود العامل الرئيسي في اختيار استراتيجية تبريد مناسبة. يوضح الجدول (1.II) أنه كل طريقة تبريد تتوافق مع الطاقة الناتجة للخلية، كما يذكر فوائد وعيوب كل طريقة.

الجدول (1.II): الحلول الممكنة لتبريد PEMFC [23].

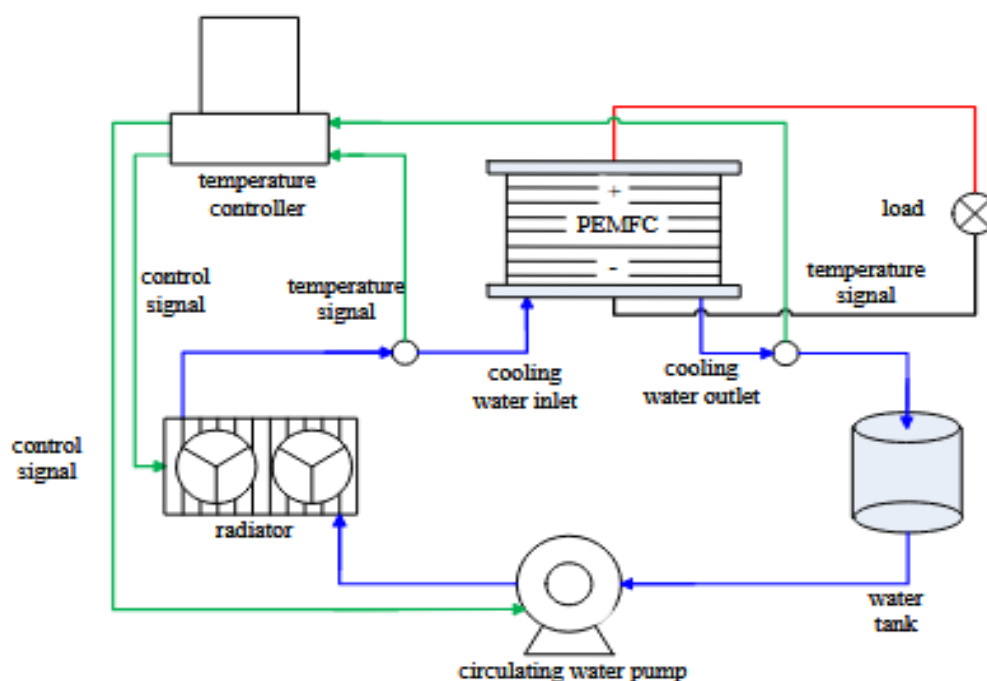
| العيوب | المزايا | طريقة التبريد | الطاقة P_{out} |
|---|--|----------------------------|------------------|
| لا يمكن إزالة الحرارة عن طريق الحمل الحراري الحر وزن كبير ومساحة مشغولة | تصميم نظام أبسط لا يتطلب حلقة تبريد | التبريد بهواء الكاثود | $<200W$ |
| ليس نهجاً عملياً لتبريد FC الطاقة الاحتياطية تحد من أداء التبريد | تصميم نظام أبسط انخفاض الطاقة الاحتياطية لا يتطلب حلقة تبريد | التبريد بالهواء المنفصل | 200W-2KW |
| الطول الحراري محدود | انخفاض الطاقة الاحتياطية زيادة موثوقية النظام | التبريد بالموزعات الحرارية | $\approx 1000W$ |
| عدم استقرار التدفق | لا يتطلب مضخة تبريد انخفاض معدل تدفق المبرد | التبريد بتغيير الطور | $\approx 1000W$ |
| تصميم معقد بداية باردة | التحكم في معدل تبخر الماء | التبريد بالتبخير | 500W-100KW |
| قد تكون هناك حاجة إلى أدوات إضافية ثقل حجم المبرد (Radiator) | قدرة تبريد عالية التحكم الجيد في معدل التبريد مناسبة لتطبيقات صناعة السيارات | التبريد بالسائل | $>10KW$ |

بما أن الحرارة النوعية للماء أكبر بأربع مرات تقريباً من حرارة الهواء (أي تتمتع السوائل بقدرة حرارية محددة وموصلية ومعامل نقل حرارة أعلى من الغازات)، فإن استخدام الماء كمبرد بدلاً من الهواء يعزز فعالية التبريد ويقلل من حجم المبادل الحراري. التبريد بالسائل يستخدم في الغالب لمكدس PEMFC الكبير بقدرة أكبر من 10KW، مثل تلك المستخدمة في السيارات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) [84,75]، وهذا ما قاد الأبحاث والتطورات إلى تفضيل استخدام التبريد بالسائل المبرد في جميع مركبات النقل التي تستخدم مكدسات PEMFC كمحرك.

4.II. تقنية التبريد بالسائل

تعتمد طرق التبريد على عدة عوامل، مثل: حجم خلية الوقود، تعقيد النظام، التطبيق، التكلفة، وكمية الحرارة المستردة. بالنسبة لتطبيقات السيارات والمركبات الكبيرة، يُفضل التبريد بالسائل لأنه ليس له قيود من حيث الحجم والوزن وتعقيد النظام. بالإضافة إلى ذلك، يتمتع التبريد بالسائل بمعدل إزالة حرارة مرتفع بسبب موصليته وسعته الحرارية العالية [85].

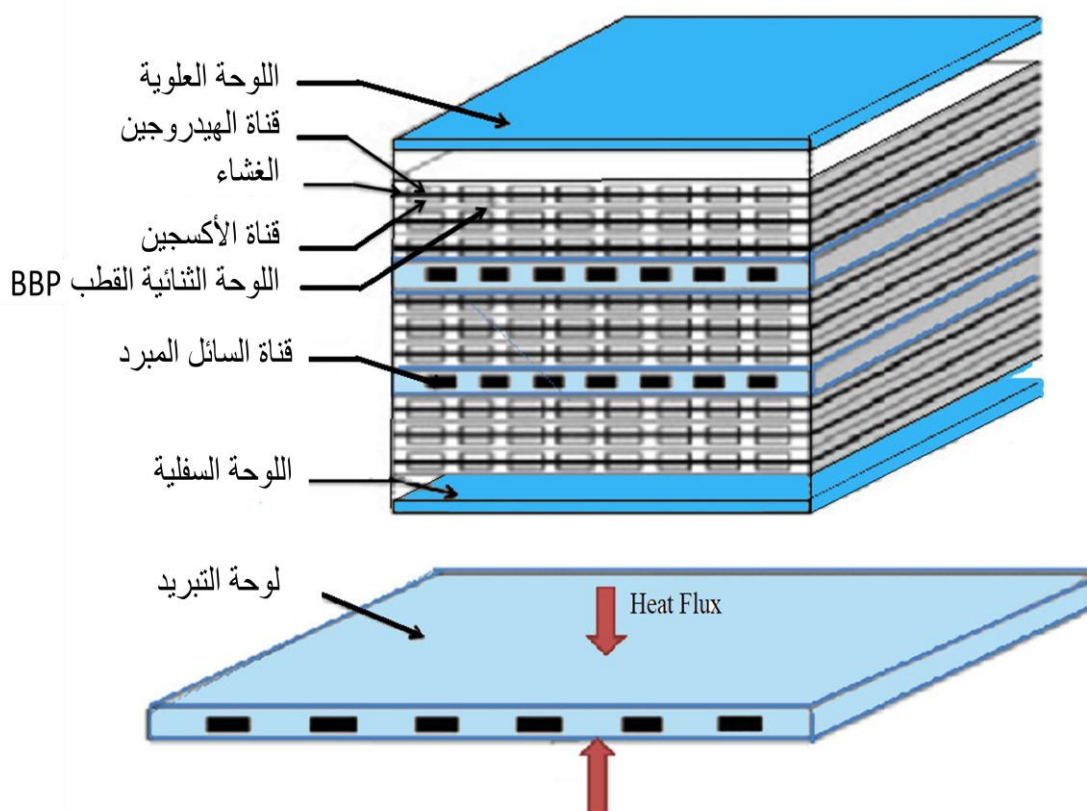
يظهر الشكل (3.II) نظام التبريد بالسائل، تتم إزالة الحرارة من المكندس عن طريق الحمل القسري للسائل من خلال قنوات تحفر داخل الصفائح ثنائية القطب أو في ألواح تبريد مخصصة. ثم يمر عبر المبرد (Radiator) ذو الزعانف ذات التدفق المتقاطع لرفض الحرارة المهذرة من السائل إلى الهواء (البيئة) أو استخدامها في أغراض مختلفة، مما تقل درجة حرارته. وفي النهاية يتم ضخه مرة أخرى إلى PEMFC لتكرار دورة التبريد. يتم تنظيم درجة حرارة المكندس من خلال التحكم في التغذية الراجعة لصمام تمرير المبرد (Radiator By-pass volve)، ويتم الحفاظ على زيادة درجة حرارة المبرد عبر المكندس $5C^{\circ}$ على الأكثر باستخدام مضخة (pump) ذات معدل تدفق متغير. ولكن نظرًا للمكونات الإضافية المطلوبة مثل مضخة الماء وصمام الصرف، يمكن أن ترتفع تكلفة التبريد ويثقل الحجم قليلاً.



الشكل (3.II): نظام التبريد بالسائل (الماء) [86].

بشكل عام، يتم توصيل العديد من وحدات خلايا الوقود بشكل تسلسلي لتكوين مكندس خلايا الوقود وتوليد المستوى المطلوب من طاقة الخرج (P_{out}). ويمكن الحصول على تحسين أداء PEMFC عن طريق زيادة درجة حرارة التشغيل، وذلك بسبب تأثير زيادة معدلات الحركة الكهروكيميائية في طبقات المحفز. لحماية خلية الوقود من الحرارة الزائدة، يتم تمرير سائل مبرد (كالماء أو إيثيلين الغلايكول أو سائل مضاد للتجمد.....) من خلال قنوات متكونة في ألواح خاصة تسمى بألواح التبريد (cooling plates) تصنع عادةً من الغرافيت مثبتة داخل المكندس في تسلسل متكرر كما هو مبين في الشكل (4.II)، حيث يوضح تموضع لوحة التبريد بواسطة الماء (Water Cooling Channel) بين خلايا المكندس.

يتمثل دور ألواح التبريد في تجنب ارتفاع درجة الحرارة وتوفير توزيع موحد لدرجة الحرارة عن طريق تقليل درجات الحرارة القصوى وتغييرات درجات الحرارة المحلية داخل خلايا الوقود، حيث تعمل كل لوحة تبريد على تبريد العديد من خلايا المكس. بشكل عام، يسمح التوزيع الموحد لدرجة الحرارة بأداء ومثانة أفضل لمركبات PEMFC، إضافة إلى التحكم التشغيلي الأسهل. وفي دراسة Sasmito et al [87] تم تقييم عددي لوضع ألواح التبريد في مكس PEMFC المبردة بالماء بأربعة تكوينات متكررة، تتألف من خلية واحدة واثنين وثلاث وأربع خلايا بين كل زوج من ألواح التبريد. كما قام بدراسة تأثيرات معدل تدفق ودرجة حرارة سائل التبريد، حيث أظهر أنّ هناك علاقة قوية بين الأداء وظروف التشغيل وكيفية وضع لوحات التبريد.

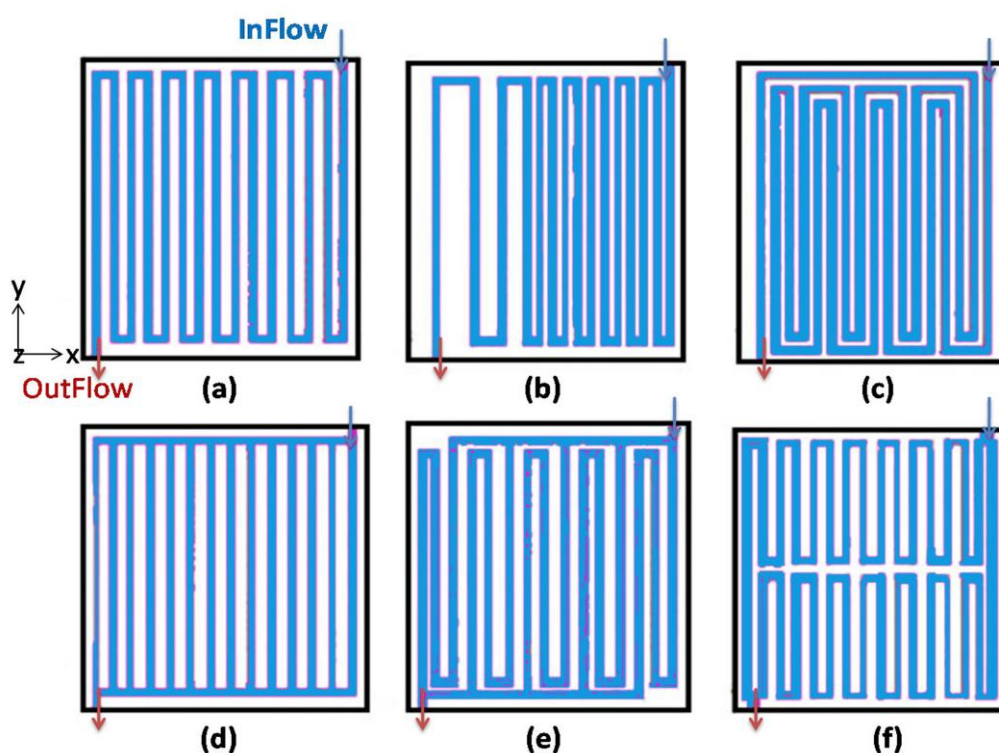


الشكل (4.11): رسم تخطيطي لمكس خلايا الوقود ولوحة التبريد الخاصة بها [88].

1.4.11. تصميم قناة التبريد

هندسة قنوات تدفق السوائل المبردة في ألواح التبريد أحد أهم العوامل في الإدارة الحرارية لخلية الوقود. لقد تم النظر في أنواع مختلفة من حقول تدفق التبريد لمكسات خلية PEMFC المبردة بالسائل حتى الآن. من بين الأنواع المختلفة، تعد نماذج مجال التدفق المتوازي (parallel) و السربنتيني (serpentine) والمتوازي/السربنتيني أكثر عملية [84]. ينبغي تصميم مجال تدفق التبريد بحيث يتم استيفاء المتطلبات الأساسية التالية في وقت واحد [89]؛ رفض الحرارة عند جهود عمل مختلفة، هبوط الضغط منخفض في مجال التدفق، وتوزيع موحد لدرجة الحرارة. عادةً، كل تصميم قناة تبريد له خصائصه ونتائجه المحددة. تم اقتراح واختبار العديد من تصميمات حقول تدفق سائل التبريد وتعديلات القنوات لتعزيز أداء التبريد.

Chen et al [88] اعتمد على ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) ثلاثي الأبعاد (3D) للتحقيق في عملية التبريد المزدوجة المتضمنة في تدفق السوائل ونقل الحرارة بين اللوحة الصلبة وتدفق سائل التبريد لتحسين تصميم التبريد لمكدس PEMFC. حيث تم اقتراح مفهوم مؤشر توحيد درجة الحرارة U_T (Temperature uniformity Index)، وهو التغير في درجة الحرارة على كامل مساحة ألواح التبريد لتقييم توزيع درجة الحرارة عليها. تم تحليل ومقارنة ستة تكوينات لمجال تدفق سائل التبريد؛ بما في ذلك ثلاثة من النوع السربنتيني، وثلاثة من النوع المتوازي موضحة في الشكل (5.II). وجد أن التكوينات السربنتينية لديها (U_T) أقل، أي تأثيرات تبريد أفضل. لكن من حيث هبوط الضغط (ΔP) وجد أن النوع المتوازي لديه (ΔP) أقل. لذلك اقترح أنه عند تحسين التبريد يلزم النظر في توزيع الحرارة وهبوط الضغط معاً للمزيد من التحقق.



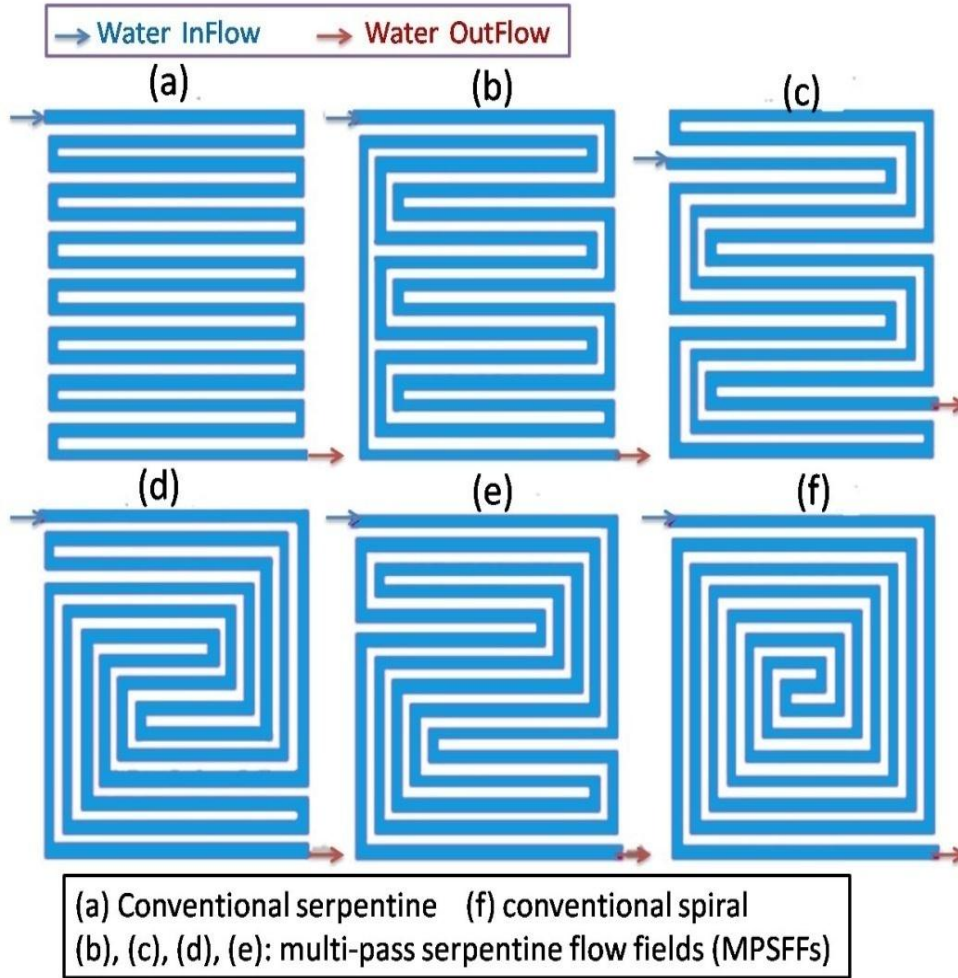
(a), (b), (c): serpentine-type passages (d), (e), (f): illustrate parallel-type passages

الشكل (5.II): بنية قناة السائل في لوحة التبريد: (a) و (b) و (c) مسارات من النوع السربنتيني، (d) و (e) و (f) مسارات من النوع المتوازي.

Choi et al [90] قام بتحليل عددي باستخدام (CFD) ثلاثي الأبعاد لأداء ألواح التبريد في خلية وقود PEM على غرار عمل Chen et al، ودرس التصميمات المتوازية والسربنتينية. لقد اعتمد على درجة حرارة السطح القصوى T_{max} كمعايير للتحسين. واستخدم أيضاً التدفق الحراري الموحد لتوليد الحرارة، قام بتحليل ثلاث قيم مختلفة لتدفق الحرارة لخلية واحدة وثلاث وخمس وحدات. من نتائج المحاكاة توصل إلى أن T_{max} تزداد خطياً مع زيادة التدفق الحراري.

Yu et al [91] نموذج محاكاة (CFD) لتدفق الموائع ونقل الحرارة في ألواح التبريد. حيث صمم أربعة حقول تبريد جديدة متعددة الممرات (MPSFFs) ذات مدخل ومخرج واحد وقام بمقارنتها بالحقول

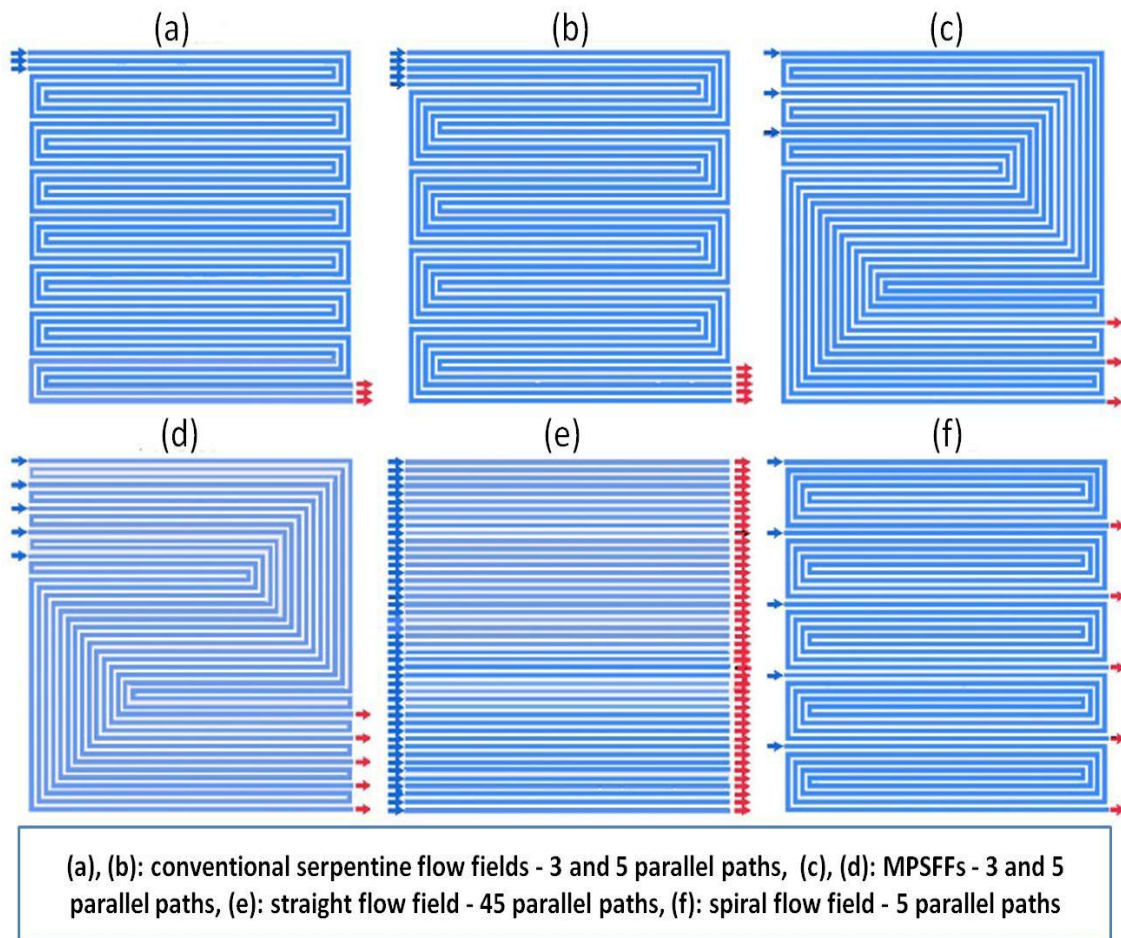
السربنتيني والحلزوني التقليدي. كما في الشكل (6.II). وقام بدراسة تأثير رقم رينولدز (Re) والتدفق الحراري على أداء الخلية. توصل إلى أنّ تصميمات التدفق السربنتينية متعددة الممرات تعمل على تحسين أداء الخلية، حيث لاحظ أنّ مؤشر U_T ينخفض بحوالي (40-60%) في هذه المجالات. كما تمّ التوصل إلى أنّ حقل التدفق الحلزوني و(MPSFFs) الأربعة يحدث فيها انخفاض كبير في هبوط الضغط (ΔP) مقارنة بحقل التدفق السربنتيني التقليدي. وبناءً على تقاريره، فإن تطبيق التدفق الحراري المستمر بعيد كل البعد عن الواقع ويمكن أن يؤثر على نتائج الحسابات.



الشكل (6.II): تصميم مجالات تدفق المبرد: (a) سربنتيني تقليدي، (b) و (c) و (d) و (e) مجالات سربنتينية متعددة الممرات (MPSFFs)، (f) مجال تدفق حلزوني تقليدي.

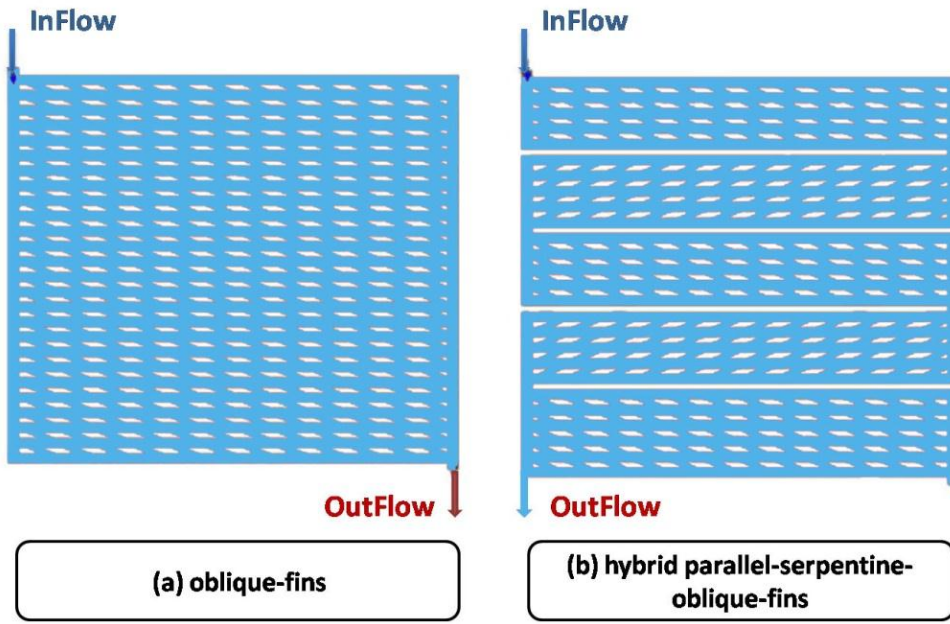
Hashmi [22] درس أيضا تصميمات سربنتينية مختلفة لحقول التدفق مع حالة انتقال الحرارة المترافقة في حالة مستقرة. وأظهر أنه على أساس معيار توليد الأنثروبيا الإجمالي التصميم السربنتيني الفردي التقليدي أفضل من السربنتيني الفردي المعدل، في حين أن درجة الحرارة أكثر توحيداً في النموذج المعدل.

في دراسة [84] Baek et al تمّ تقييم أداء تصميمات سربنتينية مختلفة متعددة الممرات ومتعددة المدخل والمخرج لحقل تدفق سائل التبريد من حيث T_{max} و U_T وخصائص ΔP . حيث تمّت محاكاة تدفق السائل وانتقال الحرارة في ألواح تبريد واسعة النطاق بمساحة $18 \times 18 \text{ cm}^2$ باستخدام CFD. أظهرت نتائج الدراسة أنّ تصميمات (MPSFFs) يمكن أن تحسن بشكل كبير من انتظام توزيع درجة الحرارة في لوحة التبريد مقارنة بالتصميمات التقليدية، مع الحفاظ على هبوط مماثل في ضغط سائل التبريد. كما أكدت أن أنه بالنسبة لهبوط ضغط محدد فإن تصميم القناة الحلزونية متعددة الممرات (النموذج F) له أداء أفضل من القناة الحلزونية الشائعة.



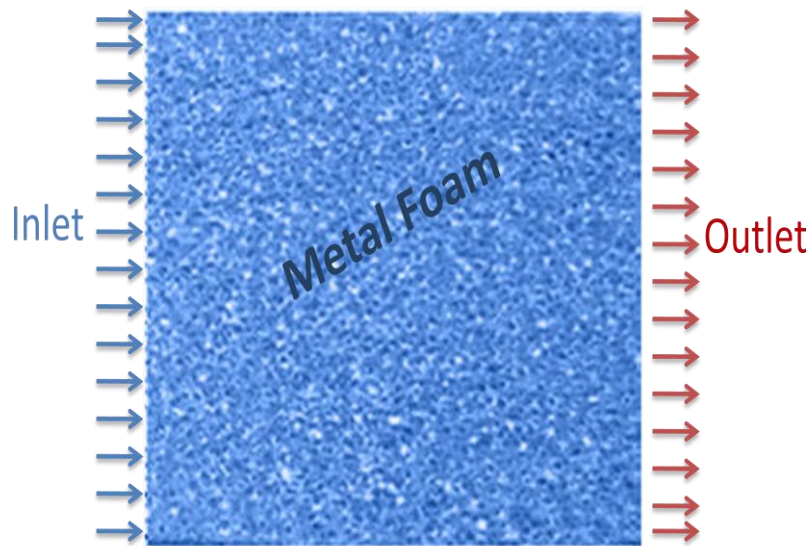
الشكل (7.II): تصميمات مجال تدفق المبرد: (a) و (b) سربنتيني تقليدي بثلاثة وخمسة مسارات متوازية، (c) و (d) سربنتيني نموذجي بثلاثة وخمسة مسارات متوازية، (e) حقل تدفق مستقيم بـ 45 مسار متوازية، (f) مجال تدفق حلزوني بخمسة مسارات متوازية.

قام Sasmito et al [92] بدراسة تقييم أداء العديد من تصميمات قنوات الغاز وقنوات التبريد في آن واحد، قام بتصميم قنوات جديدة موضحة في الشكل (8.II) وقرنها بالتصميمات التقليدية بما في ذلك المتوازي والسربنتيني والسربنتيني المتوازي وكذلك الحلزوني. أظهرت النتائج أنّ التصميم الجديد ذات الزعانف يعطي أفضل أداء مقارنة بالقنوات التقليدية. وأشار إلى أن القناة الهجينة (التصميم b) لها قوة ضخ أقل وتعتبر ذات تسيير جيد للحرارة والماء والغاز أفضل من التصميم (a). كما ناقش مزايا وقيود التصميم في ضوء النتائج العددية، توصل إلى أنه يجب تسليط الضوء على التطبيقات المحتملة ومواصلة تحسين التصميم.



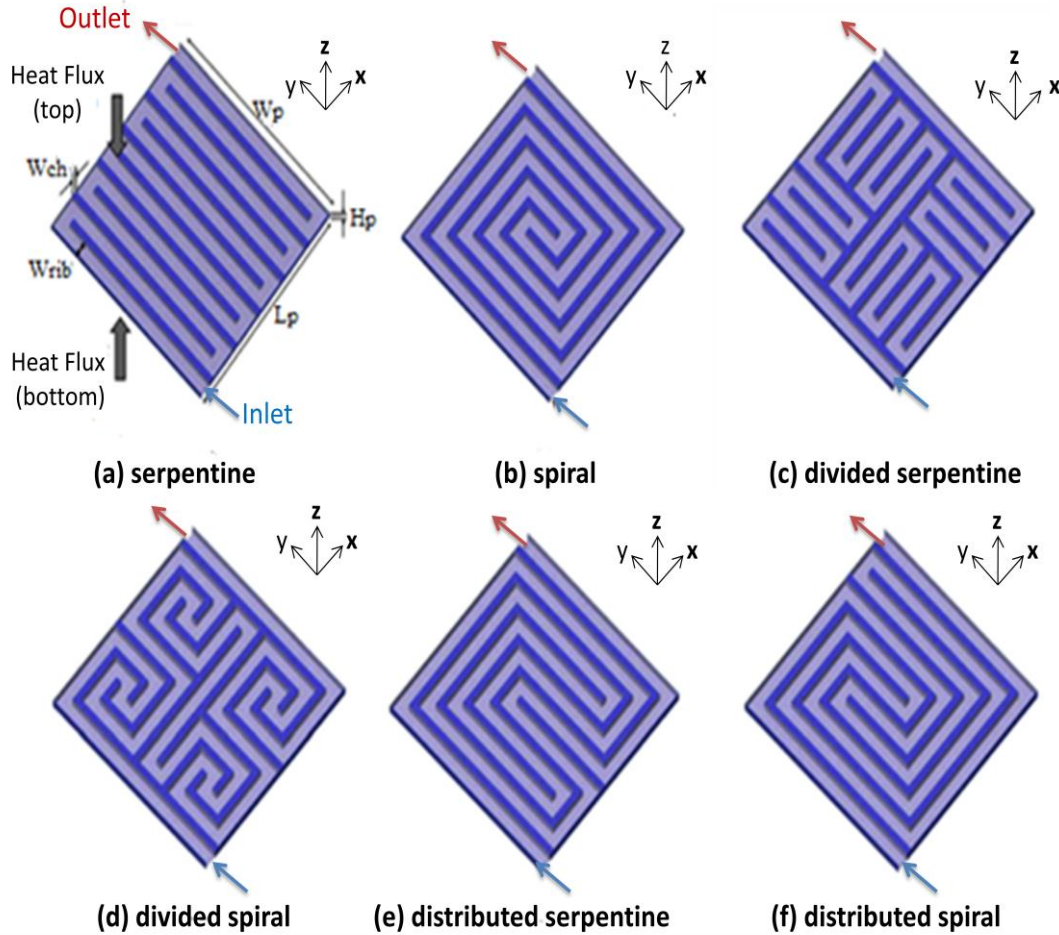
الشكل (8.II): تصميمات قنوات الغاز والمبرد Sasmito et al: (a) الزعانف المائلة، (b) تصميم هجين ذات زعانف متوازية وسرپنتينية ومائلة.

Afshari et al [94] اقترح استخدام رغوة معدنية موضحة في الشكل (9.II) كموزع لسائل التبريد في PEMFC. حيث قام بنمذجة عددية (3D) لمحاكاة تدفق المائع وانتقال الحرارة في اللوحة الرغوية بمساحة ($15 \times 15 \text{cm}^2$) ومقارنتها مع تصميمات أخرى؛ بما في ذلك التصميم المتوازي التقليدي وتصميمين سرپنتينيين متعدد الممرات. كشفت النتائج التي توصل إليها أنّ النموذج الرغوي هو الخيار الأفضل، من حيث التقليل في فرق ومتوسط درجة حرارة السطح. كما بيّن أنّه نظراً لمعامل النفاذية العالي فإن هبوط ضغط منخفض جداً في هذا النموذج. وبالتالي، يمكن استخدام هذا النموذج كموزع لسائل التبريد لتحسين أداء الخلية.



الشكل (9.II): تصميم مجال تدفق مسامي ذو رغوة معدنية.

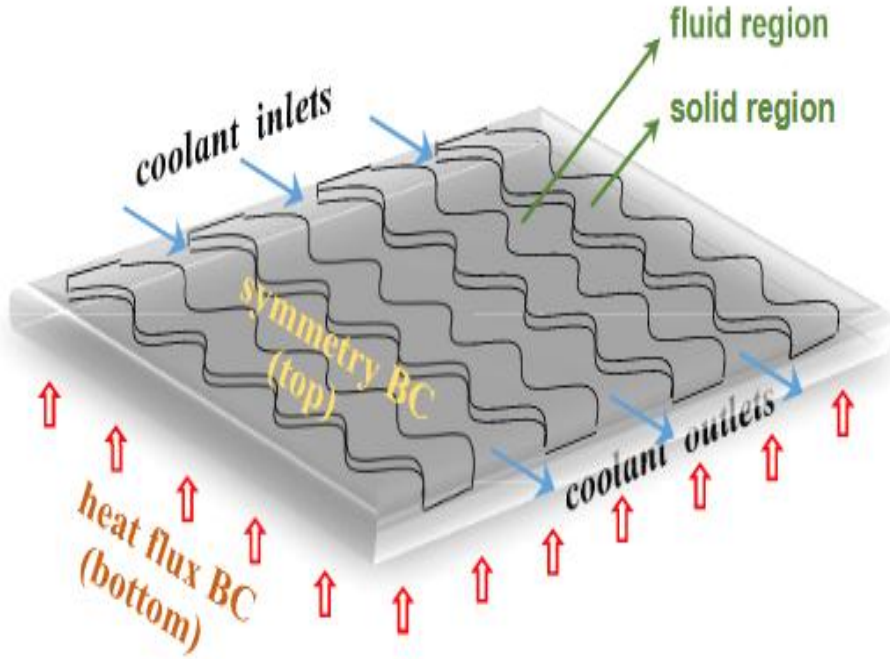
قام Ravishankar et al [93] بدراسة عددية تفصيلية (3D) لتصميمات قنوات تبريد معتمدة على التصميمات السربنتينية والحلزونية التقليدية. اقترح أربعة تصميمات جديدة موضحة في الشكل (10.II) للتنبؤ بتدفق المبرد والخصائص الحرارية. تم إجراء عمليات المحاكاة لرقم (Re) يتراوح من 415 إلى 1247 باستخدام كود يعتمد على طريقة العناصر المنتهية لحل المعادلات الحاكمة. أشارت النتائج إلى أن التصميمات الجديدة تتمتع بأداء أفضل مقارنة بالتقليدية من حيث (IUT) عند كل رقم (Re).



الشكل (10.II): تكوينات لوحة التبريد: (a) سربنتيني تقليدي، (b) حلزوني تقليدي، (c) السربنتيني المقسم، (d) الحلزوني المقسم، (e) السربنتيني الموزع، (f) الحلزوني الموزع.

في دراسة محاكاة أجراها M.Ghasimi et al [96] لتوزيع درجة الحرارة ونسبة هبوط الضغط في الخلية لست نماذج تدفق؛ بما في ذلك نموذج سربنتيني معدّل استنده من النموذج (b) لدراسة Chen et al [88]، ونموذج حلزوني تقليدي، وسربنتيني تقليدي، وسربنتيني متعدد الممرات، ومتوازي تقليدي، ونموذج سربنتيني/متوازي. أظهرت النتائج أن النموذج الحلزوني التقليدي يتمتع بتوزيع جيد في درجة الحرارة أفضل من تلك النماذج الأخرى إلا أنه لديه هبوط ضغط (ΔP) مرتفع. لكن من ناحية النظر في هبوط الضغط والتوزيع الموحد لدرجة الحرارة معا فإن التصميم السربنتيني المعدل نموذجي يتمتع بأداء أفضل. كما أظهر في دراسته في هذه الحالات أن التحليل الحراري الانتروبي والتسخين الأومي والتفاعلي شمل 35%، 20%، 45% على التوالي من إجمالي توليد الحرارة في PEMFC تقريباً.

أيضاً، E. Afshari et al [89] قام بنمذجة تدفق السوائل عبر قناة متعرجة، حيث تم تقييم الأداء من حيث (T_{max}) و (U_T) و (ΔP) . أشارت النتائج إلى أن نموذج القنوات المتعرجة انخفضت عنده كل من فرق درجة حرارة السطح و T_{max} ومؤشر (U_T) بحوالي 23% و 5% و 8% على التوالي مقارنةً بنموذج القنوات المستقيمة. كما أكد أنه يمكن تحسين أداء التبريد من خلال تطبيق نموذج القنوات المتعرجة كموزعات لسائل التبريد، على الرغم من أن هبوط الضغط في هذا النموذج أعلى من القنوات المستقيمة.

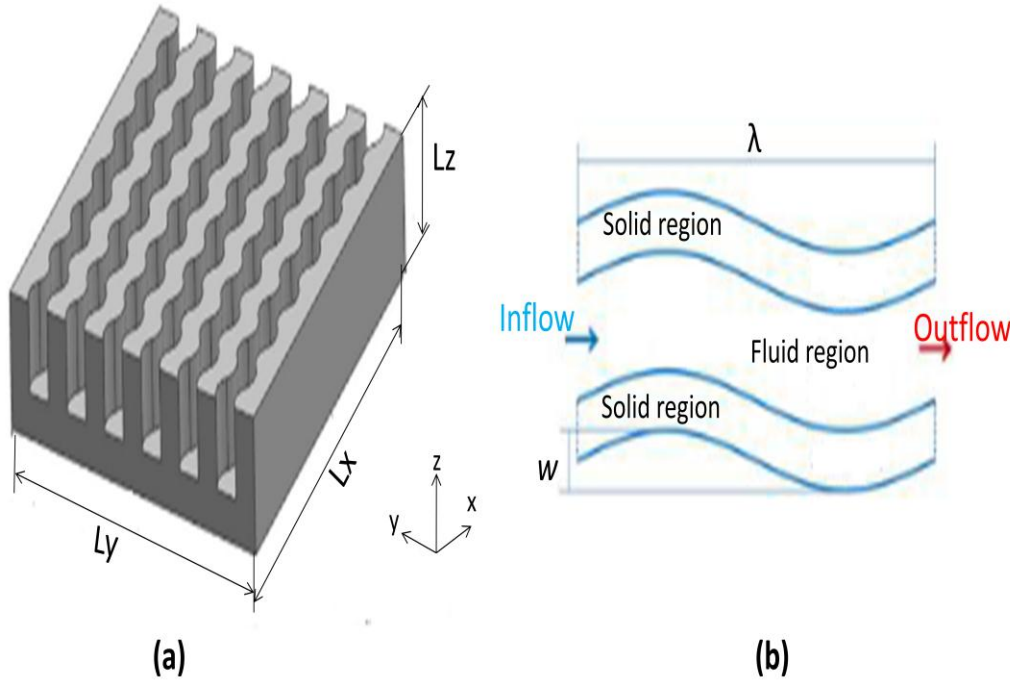


الشكل (11.11): تصميم مجال تدفق ذو قنوات منكسرة (zigzag).

في هذه الدراسة، تمت محاكاة PEMFC مع مجال تدفق التبريد. حيث تم أخذ نوعين تقليديين من مجال التدفق السربنتيني والمتوازي لألواح التبريد ومقارنتهما مع النموذج الحراري النموذجي (بدون مجال تدفق التبريد) المستخدم في برنامج Ansys Fluent. في نفس ظروف العمل، أظهرت هذه الدراسة أن نسبة (T_{MAX}) بين النموذج المتوازي والسربنتيني 1.0028، لكن بالنسبة لمؤشر (IUT) أظهرت تحسناً بنسبة 24% في المجال السربنتيني مقارنةً بالمتوازي. كما بين أن تغيير معدل نقل الحرارة يمكن أن يؤثر على أداء PEMFC باستخدام المجال السربنتيني التقليدي مقارنةً بالمتوازي.

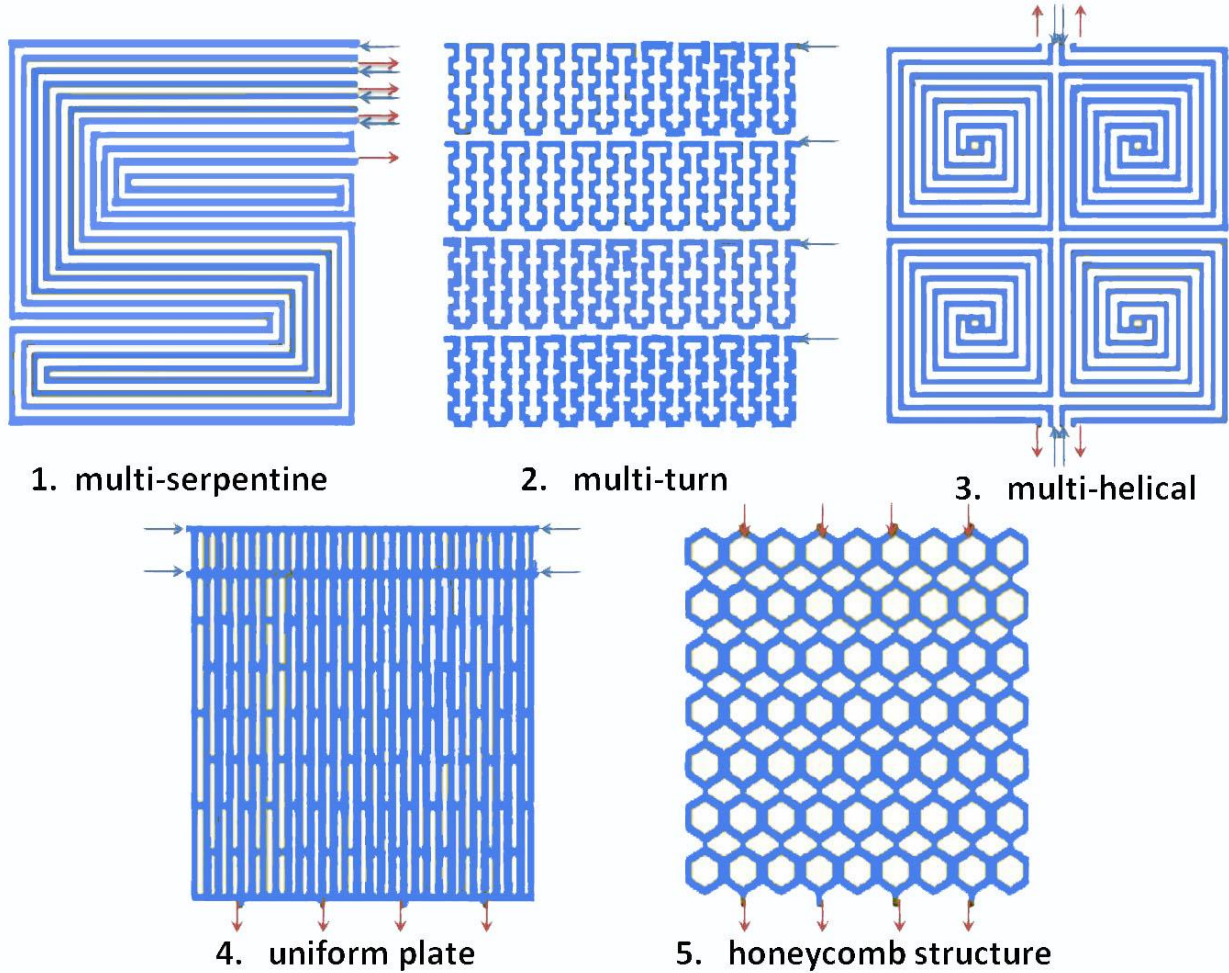
في هذا العمل [97] Li and Sunden تمّت محاكاة عددية (3D) للوحات تبريد ذات قنوات تدفق غير منتظمة ومقارنتها بالقنوات المستقيمة التقليدية. حيث تمّ النظر لأربع تصميمات: التصميم (A)، يظل ارتفاع القناة وعرضها ثابتين (قناة مستقيمة تقليدية)، التصميم (B) يظل ارتفاع القناة ثابتاً بينما يتم زيادة عرض القناة تدريجياً على طول اتجاه التدفق، التصميم (C) يظل عرض القناة ثابتاً بينما ينخفض ارتفاع القناة تدريجياً، والتصميم (D) ينخفض ارتفاع القناة تدريجياً في حين يتم زيادة عرض القناة تدريجياً. تمّ عرض النتائج من حيث توزيع درجات الحرارة و هبوط الضغط. كما تمّت دراسة تأثير التدفق الحراري ورقم (Re) المدخل على أداء التبريد. أظهر أن أداء التبريد قد تحسن بشكل ملحوظ مع تطبيق تصاميم قنوات التدفق الجديدة.

وفي دراسة أخرى أجراها Li and Sunden [98]، حيث تم تصميم قنوات مموجة كما في الشكل (12.II)، استناداً عليها من دراسة Lin et al [99]. وقاما بتطوير نموذج (3D) يتضمن آليات تدفق السوائل ونقل الحرارة لتقييم الأداء الحراري لألواح التبريد المموجة وقارنها بتصميم القنوات المستقيمة التقليدية. كما تم تقييم تأثير الطول الموجي (λ) والسعة (w) للقناة على نقل الحرارة. تمت مقارنة نتائج المحاكاة من حيث هبوط الضغط وقيم درجة الحرارة. بيّنت أن أداء التبريد قد تحسن بشكل كبير عن طريق القناة المموجة. كما تؤدي الزيادة في السعة والتقليل من الطول الموجي إلى تحسن أداء التبريد، ولكنها تؤدي أيضاً إلى زيادة هبوط الضغط. لذلك، اقترحوا قناتين جديدتين للتدفق الممتوج ذي الطول الموجي المتغير. تُظهر القنوات ذات الطول الموجي المتغير أداء تبريد أفضل مقارنة بالقنوات ذات الطول الموجي الثابت.



الشكل (12.II): (a) قنوات تبريد موجية الشكل [99]، (b) منظر قريب للقناة المموجة [98].

في عمل J. Song et al [100] تم تصميم مجال التدفق لخمس لوحات تبريد مختلفة موضحة في الشكل (13.II)، تم تحليل ΔP و U_T والسرعة للتصميمات المختلفة باستخدام (CFD). أظهرت نتائج المحاكاة أنه متعدد الحلزونات (النموذج 3) وخليّة النحل (النموذج 5) يساهمان بشكل كبير في تحسين توحيد درجة الحرارة على الرغم من ارتفاع هبوط الضغط. في حين وجد أن التدفق ذات اللوحة الموحدة (النموذج 4) له أداء ضعيف من حيث توحيد درجة الحرارة، لكن قدرته على تبديد الحرارة أفضل من قدرة السربنتيني (النموذج 1). وبصورة عامة، أثبتت هذه الدراسة أن تصميم مجال تدفق متعدد الحلزونات يمكنه تحسين انتظام وقدرة نقل الحرارة للوحة التبريد بشكل أفضل من باقي التصميمات.



الشكل (13.II): مخطط تصميم حقول التدفق: (1) تدفق متعدد السربنتين، (2) تدفق متعدد المنعطفات، (3) متعدد الحزونات، (4) لوحة موحدة، (5) بهيكل خلية النحل.

2.4.II. التبريد بالمائع النانوي (NanoFluid)

للحصول على تصميم مكدرات أكثر إحكاما لخلايا PEMFC، يلزم تحسين أداء نظام التبريد. وذلك ما يكون غالبا بالتصميم الجيد لقنوات ألواح التبريد واستخدام مبردات تتمتع بخصائص حرارية جيدة. تعد السوائل النانوية مبرداً محتملاً لتطبيقات نقل الحرارة لخلايا الوقود وتبريد الأجهزة الإلكترونية [75].

1.2.4.II. خصائص المائع النانوي

حظيت السوائل النانوية باهتمام بحثي متزايد لتطبيقات نقل الحرارة المختلفة، نظراً لخصائصها الحرارية والفيزيائية الفائقة، حيث يوضح الجدول (2.II) خصائص المائع النانوي لخلايا الوقود. ومن خلال الاستفادة من تكنولوجيا النانو، يتم تحضير السوائل النانوية عن طريق تشتت جزيئات معدنية أو غير معدنية يتراوح حجمها من 1 إلى 100 نانومتر في سائل التبريد التقليدي مثل الماء، أو جلايكول إيثيلين، أو جلايكول بروبيلين أو الزيوت..... [101]. إن الجسيمات النانوية الشائعة المستخدمة لهذا الغرض تتمثل في: أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) وأكسيد التيتانيوم (TiO_2)، وأكسيد السيليكون (SiO_2)، وأنابيب الكربون النانوية (CNT) وأكسيد الزنك (ZnO) وأكسيد النحاس (CuO)..... [27].

الجدول (2.II): خصائص المائع النانوي المستخدم لتبريد PEMFC [28].

| المقدار | الوصف | المعايير |
|--|--|-------------------------|
| $2S/cm >$ | زيادة ناقلية المبرد للكهرباء تقلل من أداء التبريد، لذلك يلزم تشتت نسبة قليلة جدا من الجسيمات النانوية في السائل التقليدي | الموصلية الكهربائية |
| $0.4W/m.K <$ | عندما تكون عالية سيكون البرد النانوي أفضل لنقل الحرارة | الموصلية الحرارية |
| $1cP >$ عند $(80^{\circ}C)$ | عندما تكون منخفضة سيكون المبرد النانوي أفضل لنقل الحرارة وضخ الطاقة | اللزوجة |
| $3kJ/kg.K <$ | عندما تكون عالية سيكون البرد النانوي أفضل لنقل الحرارة | الحرارة النوعية |
| 5000 ساعة من التشغيل | المبرد النانوي عندما يكون أكثر متانة تقل تكلفة التشغيل | المتانة |
| / | يجب أن يكون المبرد النانوي متوافقا مع مادة صنع لوحة التبريد لتفادي التآكل | توافق المادة |
| أقل تسمح من السائل التقليدي نقطة الوميض $< 93.3^{\circ}C$ | يجب أن تصنف على أنها غير سامة لنقل الكتلة وغير قابلة للاشتعال | التسمم وقابلية الاشتعال |

2.2.4.II. مزايا المائع النانوي

يوفر استخدام السوائل النانوية كمبردات لخلايا الوقود العديد من المزايا، حيث نوضح مقارنة بين أنظمة التبريد التقليدية وأنظمة المائع النانوي لخلية PEMFC كما يلي [102]:

- تعمل الجسيمات النانوية المعلقة بمساحاتها السطحية الكبيرة على تعزيز الخصائص الحرارية للمائع النانوي بشكل جيد، من حيث التوصيل والحمل الحراري، والانتشار الحراري واللزوجة، والتي تكون ضعيفة في السائل التقليدي.
- يمكن إضافة كمية قليلة جدا من الجسيمات النانوية في السائل التقليدي أن تحبس حركة الأيونات السالبة والموجبة للسائل التقليدي، مما يلغي الحاجة إلى استخدام مرشح إزالة الأيونات داخل دورة التبريد.
- تحتوي بعض أنواع السوائل النانوية على نقاط تجمد منخفضة جدًا، ويمكن اعتبار هذا ميزة لخلايا الوقود التي تعمل في الطقس شديد البرودة.
- تسمح السوائل النانوية بخصائصها المحسنة لنقل الحرارة بتقليل حجم المبادل الحراري والخسائر الطفيلية لنظام التبريد، مما يقلل من وزن وتكلفة المكثف على عكس التبريد بالسائل التقليدي.
- عند استخدام السوائل النانوية تتطلب طاقة ضخ قليلة في قنوات تدفق المبرد.

3.2.4.II. تطبيق المائع النانوي في PEMFC

إنّ العوامل التي تم تحديدها والتي تؤثر على التوصيل الحراري للسوائل النانوية تتمثل في نوع الجسيمات النانوية وحجمها وشكلها وتركيزها، بالإضافة إلى نوع السوائل الأساسية ودرجة حرارة تشغيلها.

تم إجراء الكثير من الأبحاث عددياً وتجريبياً حول اعتماد السوائل النانوية في نظام التبريد لخلايا وقود غشاء التبادل البروتوني:

Islam et al [103] قدم نموذجاً تحليلياً للتوصّل إلى تأثير استخدام السائل النانوي كمبرد على حجم المبادل الحراري (Heat Exchanger) وقدرة الضخ في أنظمة تبريد PEMFC. درس تأثير مجموعة متنوعة من السوائل النانوية بتركيز حجمية تتراوح من 0.05 إلى 2% المعتمدة على الماء وإيثيلين جلايكول بنسبة 50:50 في خلية وقود PEM بقدرة 2.4KW. أشارت النتائج إلى أنه باستخدام تركيز حجمي 0.05% يتم الحصول على تخفيض بنسبة حوالي 21% في حجم (HE) مقارنةً باستخدام السائل الأساسي بمعدل تدفق كتلي ثابت لسائل التبريد. لكن بزيادة تركيز الجسيمات النانوية أكثر من 0.05% يتم الحصول على تخفيض بنسبة حوالي 4% فقط. وبالرغم من ذلك لم يتم العثور على اختلاف كبير في قوة الضخ عند استخدام الموائع النانوية مقارنة بالسائل التقليدي.

Talib et al [104] درس التوصيل الحراري واللزوجة والتوصيل الكهربائي لتركيزات مختلفة من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) المخففة في خلاط جلايكول إيثيلين والماء (EG/W) ذات 40EG و 50EG و 60EG. أكد أنّ التوصيل الكهربائي من شأنه أن يساهم في التسرب الكهربائي وهو عامل مقيد لتشغيل خلايا الوقود. أظهرت النتائج أن أعلى قيمة للتوصيل الحراري المسجلة تكون عند تشتت السائل النانوي في SiO_2 في 40EG بينما اللزوجة تكون أعلى في التخفيف 60EG. تم تسجيل الموصلية الكهربائية الأعلى في (EG/W 40:60) مع تركيز حجمي 0.5% لـ SiO_2 . كما أشار من خلال دراسته إلى أنّ تشتت السائل النانوي (SiO_2) في خليط (EG/W) يؤدي إلى تعزيز نقل الحرارة.

Zakaria et al [105] قام تجريبياً بدراسة التعزيز الحراري من خلال تطبيق سائل التبريد النانوي ذو تركيز منخفض من الجسيمات النانوية لـ Al_2O_3 مشتت في خليط (EG/W) في لوحة تبريد واحدة من جرافيت الكربون لخلية وقود PEM. تم استخدام جسيمات Al_2O_3 النانوية بتركيز 0.1% و 0.5% ثم تمّ تشتيتها في خليط (EG/W 50:50). لاحظ تأثير معدلات التدفق المختلفة على تحسين انتقال الحرارة وتدفق السوائل ممثلة في مجال عدد Re من 20 إلى 120. أشارت النتائج إلى تحسين انتقال الحرارة بنسبة 13.87% لتركيز Al_2O_3 (0.5%) مقارنة بالمائع الأساسي. لكن أشارت إلى أنّ هبوط الضغط يزداد مما يؤدي إلى زيادة طاقة الضخ.

Islam et al [106] أجرى دراسة تجريبية على الأداء الحراري والكهربائي لخلية وقود PEM صغيرة الحجم (2.4kW). تمّ استخدام السائل النانوي أكسيد الزنك (ZnO) المعتمد على خليط (EG/W 50:50) كمبرد. أظهر استخدام مائع (ZnO) النانوي بنسبة 0.5% زيادة أقل من 10% في قوة الضخ مقارنةً بالسائل التقليدي (EG/W 50:50). خلصت هذه الدراسة إلى أنه يمكن تطبيق السائل ZnO النانوي على نظام التبريد PEMFC دون التأثير على أي الأداء الكهربائي للنظام.

Islam and Shabani [107] استخدموا TiO_2 سائل النانوية بتركيزات تتراوح بين 0.05% و 0.5% (كما اقترحت الدراسات السابقة) لدراسة موصليتها الكهربائية تجريبياً في نطاق $20-70^\circ\text{C}$ (أي حالة تشغيل PEMFC). تؤدي زيادة تركيز الجسيمات النانوية TiO_2 إلى زيادة التوصيل الكهربائي للمائع النانوي، بحيث أنه مع تركيز 0.5% عند 60°C وجد أن الموصلية الكهربائية تزيد بأكثر من 9 مرات عن تلك الموجودة في السائل الأساسي. ومع ذلك فإن النماذج الحالية لا يمكنها التنبؤ بذلك بدقة. علاوة على ذلك، على الرغم من عدم دعمها بالبيانات التجريبية، فإن الارتباطات القياسية للتوصيل الكهربائي للسوائل

النانوية لا تعتمد على درجة الحرارة. تم بعد ذلك استخدام هذه البيانات لتطوير علاقة جديدة لتقدير التوصيل الكهربائي للسوائل النانوية (TiO_2) بتركيزات ودرجات حرارة مختلفة في نطاقات مناسبة للاستخدام كمبردات في خلايا الوقود PEM.

Zakaria et al [108] قدّم تقرير تجريبي عن الأداء الحراري لمبردات السائل (SiO_2) النانوي كبديل للمياه المقطرة التقليدية. حيث تم تشتيت الجسيمات النانوية SiO_2 في الماء المقطر بتركيزات حجمية 0.1% و 0.3% و 0.5% وتم اختبارها في نظام لوحة تبريد بقناة متوازية. تم توفير حمل حراري ثابت لمحاكاة الحالة الحرارية لمكدس الخلية في ظروف تدفق المدخل من 750 إلى 900 رقم رينولدز، بيّنت النتائج أنّ السوائل النانوية SiO_2 خفضت متوسط درجات حرارة اللوحة بنسبة 15-20% مقارنة بالماء التقليدي. وأكّدوا على أنّ السائل النانوي SiO_2 والتصميم الجيد للوحة التبريد من الخيارات الممكنة لممارسة الإدارة الحرارية لخلايا PEMFC المتقدمة في تصميمات المكدس المستقبلية.

Saeeden et al [109] اقترح استخدام السائل النانوي CuO المعتمد على الماء كسائل تبريد، وملء مجال التدفق في ألواح التبريد برغوة معدنية. قام بنمذجة (3D) تعتمد على طريقة الحجوم المنتهية لدراسة تأثير استخدام الموائع النانوية عند مسامات مختلفة وأحجام المسام وسمك الرغوة المعدنية على الأداء الحراري لخلية PEMFC. أشارت النتائج إلى أنه عند أرقام (Re) المنخفضة يكون دور الجسيمات النانوية في تحسين توحيد درجة الحرارة أكثر وضوحاً. علاوة على ذلك، يمكن للرغوة المعدنية خفض درجة الحرارة القصوى بحوالي 16.5K وجعل توزيع درجة الحرارة موحداً في قناة التبريد، بينما يزداد هبوط الضغط بنسبة قليلة.

Idris et al [101] تم تحليل وعرض التعزيز الحراري لألواح تبريد PEMFC. حيث تم استخدام السائل النانوي الهجين $Al_2O_3:SiO_2$ كمبرد. تركز الدراسة على تركيز حجمي 0.5% أساسه الماء لموائع نانوية Al_2O_3 مفردة، و SiO_2 نانوية مفردة، وسوائل نانوية هجينة $Al_2O_3:SiO_2$ مع نسبة السائل خليط نانوية (EG/W) 10:90 و 50:50. وقد لوحظ تأثير نسب مختلفة من الموائع النانوية على تعزيز انتقال الحرارة وتدفق السوائل في مجال (Re) من 400 إلى 2000. أشارت النتائج إلى أنّ السوائل النانوية الهجينة $Al_2O_3:SiO_2$ بنسبة (10:90) تتمتع بأعلى معامل نقل للحرارة مقارنة بالسوائل النانوية الأخرى المستخدمة في تلك العمل، ثم تليها السوائل الهجينة بنسبة (50:50). ولذلك، خلصوا إلى أن السوائل النانوية الهجينة $Al_2O_3:SiO_2$ تعمل على تحسين سلوك السوائل النانوية المفردة ولديها إمكانات أفضل للتطبيقات المستقبلية في الإدارة الحرارية لـ PEMFC.

5.II. خلاصة

في هذا الفصل ذكرنا بعض الأعمال البحثية المختلفة التي تم إجراؤها في مجال هندسة ألواح التبريد لمكدسات PEMFC. توفر كل هندسة مجالات تدفق مزايا وعيوب تبعاً لظروف الاستخدام. يتم استخدام أشكال هندسية جديدة لتحسين وظيفة تبريد PEMFC وتطويرها في هذا العمل وذلك باستخدام محاكاة ثلاثية الأبعاد بكون ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) بتطبيق برنامج Ansys Fluent. وستكون التفاصيل في الفصل التالي، حيث اعتمد هذا العمل أيضاً على استخدام السائل النانوي بدلاً من السائل التقليدي (الماء) لتعزيز النقل الحراري أكثر.

الفصل الثالث

محاكاة العمل باستخدام ديناميكا
الموائع الحسابية (CFD)

1.III. مقدمة

على الرغم من البساطة النسبية لهيكل خلية وقود غشاء التبادل البروتوني، لكن الآليات الفيزيائية والكهروكيميائية للخلية معقدة إلى حد ما. ولوصف الخلية رياضياً، من الضروري مراعاة ظواهر النقل المختلفة التي تحدث في الخلية بما في ذلك؛ نقل الكتلة والشحنة، ونقل الحرارة، وحركية التفاعلات الكهروكيميائية، ونقل المراحل المختلفة للمياه، وعمليات تغيير الطور، وكذلك نقل الطاقة المتأصلة في جميع العمليات المذكورة أعلاه. تحدث تلك الظواهر المختلفة بشكل معقد (متراصة وغير خطية) مما يؤدي إلى صعوبة تصميمها. لذلك، فإن بعض افتراضات التبسيط ضرورية حتى تتمكن من تطوير نموذج كامل دون فقدان الخصائص العامة لمكدس PEMFC.

من بين مشاكل الظواهر التي تحدث في مكدرات خلايا PEMFC، نجد توليد طاقة حرارية زائدة عن الطاقة الكهربائية والتي تؤثر بشكل سلبي على أداء الخلية، وعلى أداء ومثانة وتكلفة المركبات التي تستخدم مكدرات PEMFC. ولتجنب هذه المشاكل، يلزم تحسين تسيير الإدارة الحرارية للخلية، وذلك عن طريق اختيار التبريد بواسطة تدفق سوائل نانوية ذات خصائص فيزيوحرارية جيدة في مجاري ذات بعد ميكرو أو نانو متري محفورة في ألواح جرافيتية مخصصة للتبريد. ولتفادي ارتفاع تكلفة تصنيع تلك الألواح ونجاح التجارب التطبيقية لهندستها، تكثفت دراسات عديدة تم تحليلها بواسطة نماذج رياضية حاسوبية متطورة.

في هذا الفصل، نقدم بالتفصيل تكوينات هندسية مختلفة لمجال تدفق السائل النانوي المبرد التي تم تحليلها في هذا العمل كما نعرض النموذج الرياضي المطبق لهذه المحاكاة، الذي يصف ظاهرة نقل الكتلة والحرارة والطاقة التي تحدث داخل ألواح تبريد خلية PEMFC، مع اختلاف المعادلات التفاضلية الجزئية التي تحكم تلك الظاهرة. يتطلب حل نظام التبريد لتقريب حل مشكل الإدارة الحرارية في المكدرات، يتم تنفيذ تقنية تحليل النظام باستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) وتطبيقها في برنامج (Ansys Fluent).

2.III. أساسيات CFD

أدت الزيادة في القدرة الحسابية بين الدراسات النظرية والتجريبية التي تكمل بعضها البعض لحل المسائل التي تتضمن سريان الموائع بصورة خاصة إلى ظهور نظام جديد ويتمثل في ديناميكا الموائع الحسابية (Computational Fluids Dynamic) [34]. (CFD) هي أداة تصميم وتحليل تعتمد على الكمبيوتر تستخدم لحل مجموعة المعادلات التفاضلية الجزئية المقترنة وغير الخطية الناشئة عن تدفق الموائع ونقل الحرارة والكتلة والعمليات الفيزيائية الأخرى عبر مجال معين ضمن شروط محددة، حيث تقوم هذه الأداة بتحويل المعادلات التفاضلية الجزئية الحاكمة للمشكلة المراد دراستها إلى معادلات جبرية وذلك باستخدام إحدى الطرق العددية مثل؛ طريقة العناصر المنتهية (FEM)، أو الحجوم المنتهية (FVM)، أو الفروقات المنتهية (FDM).

بشكل عام، بعد تصور المشكلة المراد دراستها من وجهة نظر المستخدم، يواجه خمس مراحل في محاكاة (CFD)؛ حيث المرحلة الأولى تتمثل في البناء الهندسي، والثانية تتمثل في إنشاء وتحديد الشبكة والثالثة تطبيق فيزياء المشكلة، تليها مرحلة الحل العددي للمشكلة، والأخيرة المعالجة اللاحقة للنتيجة العددية. ولكل مرحلة محاكاة خاصة بها [22].

III.1.2. البناء الهندسي

عادةً ما يتم بناء الهندسة من خلال وحدات البناء الهندسية كالنقاط والخطوط والأسطح، ويتم استخدام التحويلات الهندسية كالانعكاس والتدوير والترجمة والقياس للحصول على الهندسة المطلوبة. يؤثر البناء الهندسي على برامج CFD التجارية المختلفة بشكل كبير على بناء الشبكات (المرحلة الموائعية) وبالتالي سيؤثر على جودة النتائج العددية.

III.2.2. إنشاء الشبكة

عادةً ما يكون إنشاء الشبكة (Meshing) هو الخطوة الأكثر استهلاكاً للوقت في محاكاة CFD خاصة في البداية بسبب تعقيد خوارزميات الشبكة. إنشاء الشبكة تعني عملية تقسيم فرعي للمجال الحسابي إلى نقاط، وكل نقطة تمثل بمعادلة جبرية يتم حلها في النقطة المعينة ودقة التحسين. تعتمد دقة النتائج وموثوقية المحاكاة بشكل كبير على نوع الشبكة وجودتها. ولتحديد شبكة الحل تم تطوير خوارزميات مختلفة تتعلق بالتصميم الهندسي [22].

يوجد نوعان من الشبكة منظمة وغير منظمة، تحتوي الشبكة المنظمة على ترتيب منتظم لخلاياها يمكن تحديده من خلال تحديد المعلمات (parametre) كعدد العقد على الحافة (حدود الوجه) ونسبة النمو وما إلى ذلك. عادةً ما يكون حساب الشبكة المنظمة أسهل، حيث لا يتم تعريف كل خلية بشكل منفصل على عكس غير المنظمة. لكن الخلل في الشبكة المنظمة يكمن في ربط العقد الداخلية دائماً بنفس عدد العناصر فهو يتطلب هندسة جيدة.

III.3.2. تطبيق الخواص الفيزيائية والشروط الحدية

من أكثر المشاكل في محاكاة (CFD) أخطاء نمذجة الخواص الفيزيائية والشروط الحدودية، لذلك يتطلب دقة كبيرة عند تطبيق فيزياء المشكلة المعنية. بعد توليد الشبكة، في الخطوة الأولى، تعرف المجالات كمجال السائل أو الصلب مع الخصائص الفيزيائية المناسبة بناءً على الافتراضات المختارة للمحاكاة (الحالة مستقرة أو عابرة، المجال ثابت أو متغير، التدفق صفائحي أو مضطرب، التدفق متساوي الحرارة). وفي الخطوة الثانية، تحدد الشروط الحدية وهي الحدود المحيطة بالمجال الحسابي والتي يكون عندها مدخل السريان أو المخرج، وتساعد هذه الشروط كثيراً في تعريف ووصف المشكلة والوصول للحل بدقة.

III.4.2. الحل العددي

بعد الانتهاء من تطبيق النموذج العددي تليها خطوة حل هذا النموذج، وعادة ما تكون هذه الخطوة عبارة عن صندوق أسود لمعظم البرامج التجارية مثل Ansys Fluent. تتمتع أدوات الحل في محاكاة CFD بالقدرة على تصور تقارب المعادلات الحاكمة ومراقبة المتغير المحدد أثناء عملية التكرار، ومراقبة اختلالات المجال كتوازن الكتلة والطاقة. توجد عدة أنواع من الأخطاء أثناء الحل العددي، أهمها تتمثل في خطأ التمييز في المكان والزمان وذلك يحدث أثناء تحويل الصيغة التفاضلية إلى صيغة جبرية، وخطأ التكرار حيث تتطلب الصياغة الضمنية عملية تكرارية مما يؤدي إلى بقايا، وخطأ التقريب ناتج من محدودية الأرقام التي يمكن الحل بها. وللحصول على حل جيد لـ (CFD)، يمكن تقليل هذه الأخطاء بشكل منهجي من خلال إتباع مخططات تمييزية ذات ترتيب أعلى، وخفض معايير التقارب، والدقة المزدوجة وما إلى ذلك [34].

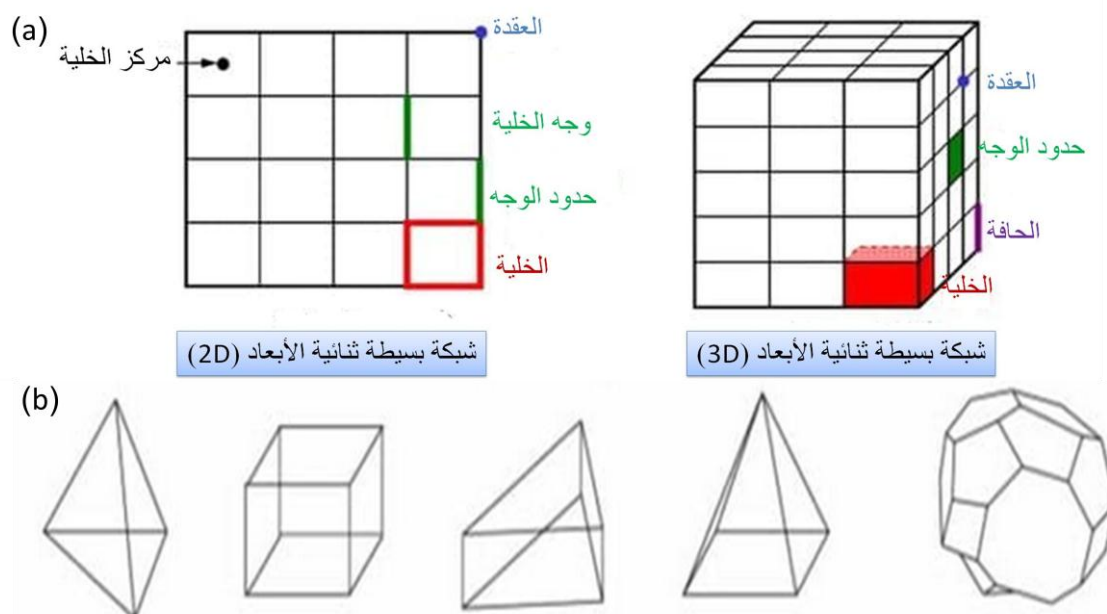
5.2.III. المعالجة اللاحقة

تتمتع معظم برامج CFD الحديثة على مجموعة واسعة من إمكانيات المعالجة اللاحقة وتخصص لتطبيقات معينة ومختلفة. في هذه المرحلة تظهر نتائج محاكاة المستخدم، حيث يمكن رؤية النتائج لمتغير معين أو مجموعة من المتغيرات على شكل رسوم بيانية، أو مخططات متجهة، أو خطوط، أو..... ما إلى ذلك، ويتم قراءتها ومناقشتها بسهولة.

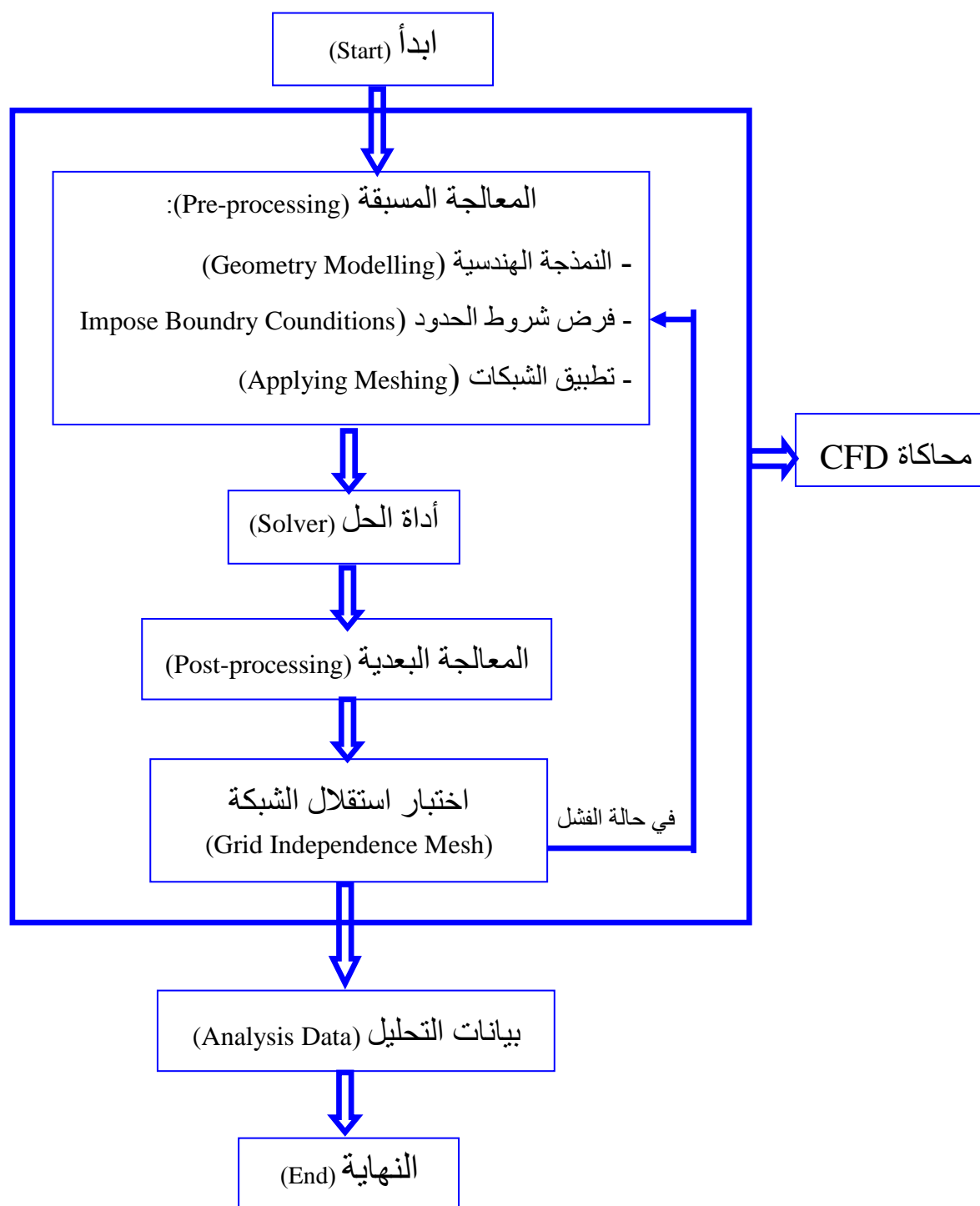
3.III. تنفيذ العمل في برنامج "Ansys Fluent"

توجد عدة برامج CFD لدراسة نقل الحرارة والكتلة وبعض العمليات الفيزيائية المختلفة التي تحدث في تصميم هندسي ما. من بين تلك البرامج اعتمدنا على برنامج Ansys Fluent لدراسة نقل الحرارة لتدفق السائل النانوي في قنوات ألواح التبريد لخلايا PEMFC، يوفر برنامج وقتًا للابتكار وتحسين التصميم المنتج والثقة في نتائج وجودة أداء المحاكاة، أيضا يمكن تطوير نماذج فيزيائية متقدمة وتحليل مجموعة متنوعة من ظواهر السوائل باستخدام هذا البرنامج، كل ذلك يعود لميزاته الخاصة مقارنة ببرامج CFD الأخرى: واجهة سهلة الاستخدام، يحتوي على أفضل نماذج الفيزياء، نافذة عمل واحدة، قدرات موازية للتوليد الشبكي والحل.

يستخدم برنامج Ansys Fluent طريقة الحجم المنتهية (Finit Volume Method) لحل المعادلات الحاكمة، حيث يتضمن ذلك تقسيم مجال المحاكاة إلى سلسلة من وحدات التحكم أو الخلايا الصغيرة المترابطة (توليد الشبكة) موضحة في الشكل (1.III)، ثم يتم حساب قيم المتغيرات (كالسرعة ودرجة الحرارة) في النقط المركزية لهذه الخلايا، ويتم استخدام خوارزمية تكرارية لحل هذه المعادلات والتوصل إلى حل متقارب.



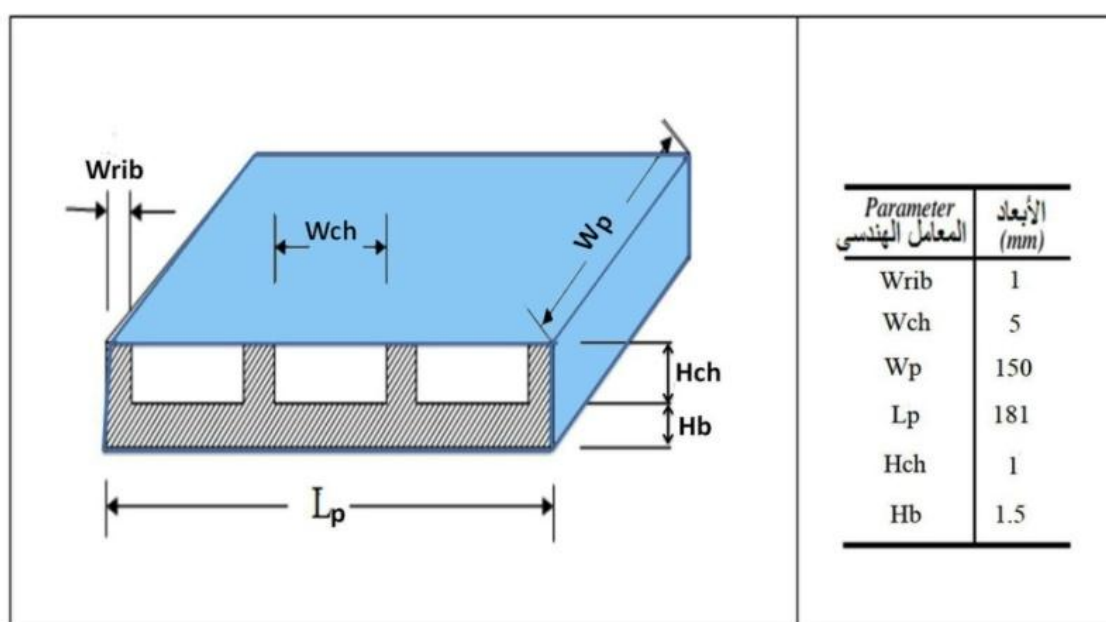
الشكل (1.III): رسم تخطيطي يوضح تقسيم المجال الحسابي في محاكاة Ansys Fluent، (a) التوليد الشبكي (b) أشكال حجوم منتهية مختلفة.



الشكل (2.III): رسم تخطيطي لخطوات المحاكاة على برنامج Ansys Fluent.

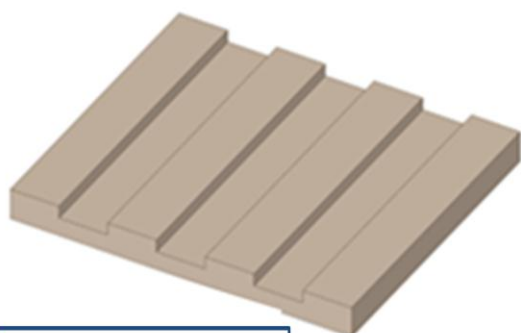
1.3.III. الوصف الهندسي

تتكون خلايا وقود PEMFC من مناطق مختلفة ومتميزة؛ بما في ذلك الغشاء البوليمري وطبقتين لتحفيز غازات التفاعلات (CL)، وطبقتين لانتشار الغازات (GDL)، ولوحنتين ثنائية القطب (BP) تشمل قنوات لتدفق الغازات (GCs). إضافة إلى ألواح تبريد (CPS) تخصص لخلايا PEMFC التي تبرد بواسطة التبريد بالسائل توضع بين زوجين من الخلايا أو مجموعة من الخلايا في المكدرات حسب التطبيق. في هذا العمل، تمت الدراسة على لوحة تبريد مستطيلة ($181 \times 150 \times 5 \text{mm}^3$) تحتوي على قنوات لتدفق السائل، متماثلة الشكل ومتوازية مع بعضها البعض وموضوعة في مجمعات موازية لحواف اللوحة. في هذا العمل، نظرا لتناظر اللوحة سوف تتم الدراسة على الجزء السفلي (النصف العرضي السفلي) فقط. حيث يوضح الشكل (3.III) مظهر اللوحة وتفصيل الأبعاد الأساسية.



الشكل (3.III): رسم تخطيطي للنصف العرضي للوحة تبريد خلية PEMFC المنمذجة في هذا العمل.

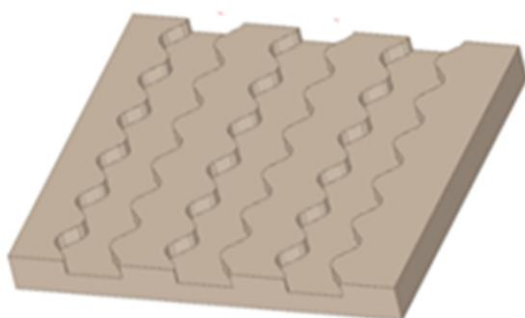
تمت هندسة خمسة أنواع من تصاميم حقول التدفق على ألواح تبريد متماثلة من حيث المادة والأبعاد موضحة في الشكل (4.III). تتمثل التصميمات في: تصميم لوحة تحتوي على قنوات مستقيمة ومتوازية مع بعضها البعض وهو تصميم تقليدي (النموذج A). وتصميم قنوات منكسرة مستندة من عمل Afchari et al (النموذج B) [89]، كذلك تصميم قناة منكسرة متموجة (النموذج C) مستندة من دراسة Li and Sundén [98]. إضافة إلى تصميم جديد يتمثل في قنوات على شكل حرف S- (النموذج D)، كما تطرقنا إلى فكرة تصميم جديد (النموذج E) ويتمثل في تقسيم القناة المستقيمة عرضيا إلى طبقتين تسمى بالقناة المستقيمة ذات طبقتين (Two Stages channel).



(A) قنوات مستقيمة عادية



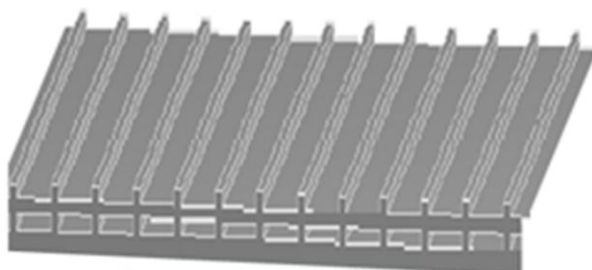
(B) قنوات منكسرة عادية



(C) قنوات منكسرة متموجة



(D) قنوات على شكل S-

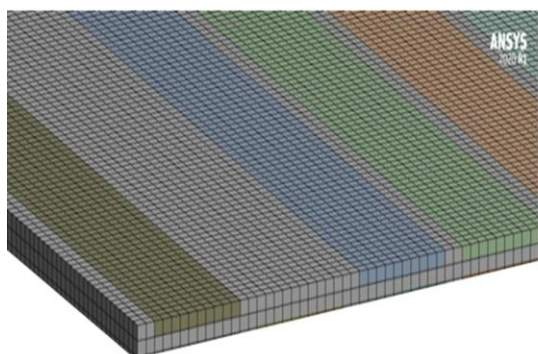
(E) قنوات مستقيمة مزدوجة
(Two stages)

الشكل (4.III): التصميمات الهندسية الخمسة النمذجة في هذا العمل.

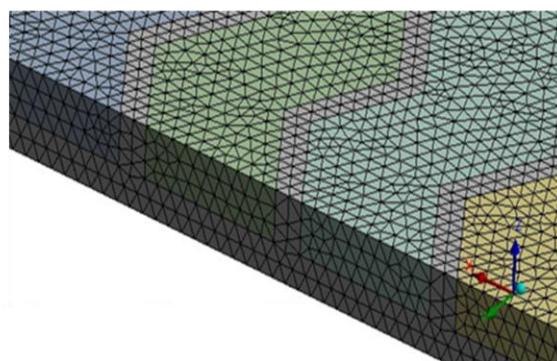
2.3.III. توليد الشبكة

يختلف اختيار الشبكة حسب التصميم الهندسي، وعندما تكون الأشكال الهندسية أكثر بساطة أو يكون مجال مقاييس طول التدفق صغيرا جدا يمكن إنشاء شبكة مثلثة أو رباعية السطوح، وذلك لأن الشبكة المثلثة أو الرباعية السطوح تسمح بتجميع الخلايا في مناطق محددة من مجال التدفق. من المحتمل أن يقسم التصميم الهندسي في شكل شبكة تحتوي على عدد معين من الخلايا ليكون التقارب أسرع مما قد يوفر بعض النفقات الحسابية.

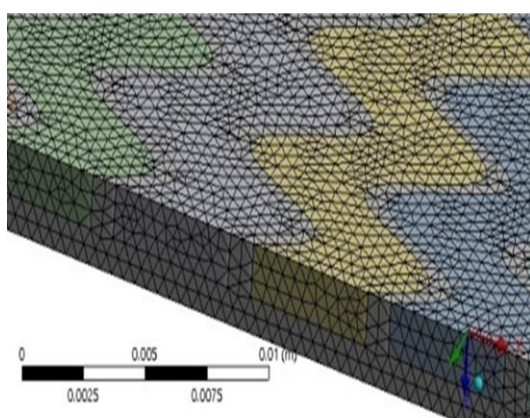
بالنسبة لهذا العمل، قمنا باختيار هياكل شبكية مختلفة. يوضح الشكل (5.III) التوليد الشبكي لكل تصميم، حيث تعتمد شبكة تصميم القنوات المستقيمة العادية وتصميم القنوات المستقيمة ذات طبقتين على خلايا رباعية الأوجه، بينما تعتمد شبكة تصميم القنوات المنكسرة والتموجة و-S- (النماذج B,C,D) على خلايا مثلثة الأوجه. إن استخدام الشبكة الرباعية في التصميمات (B,C,D) يؤدي إلى عدد كبير من الخلايا فيتطلب الحاجة إلى المزيد من موارد الكمبيوتر ووقت الحساب مقارنة بالخلايا المثلثية.



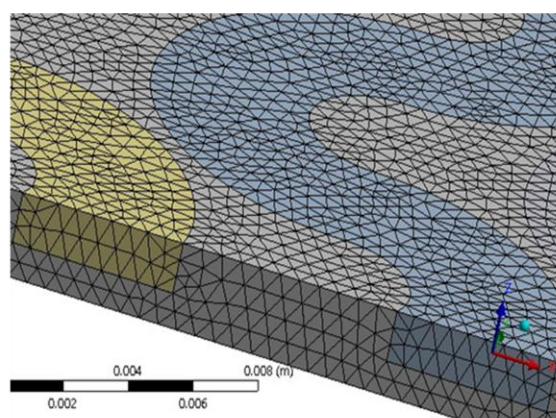
(A) Mesh – straight channels



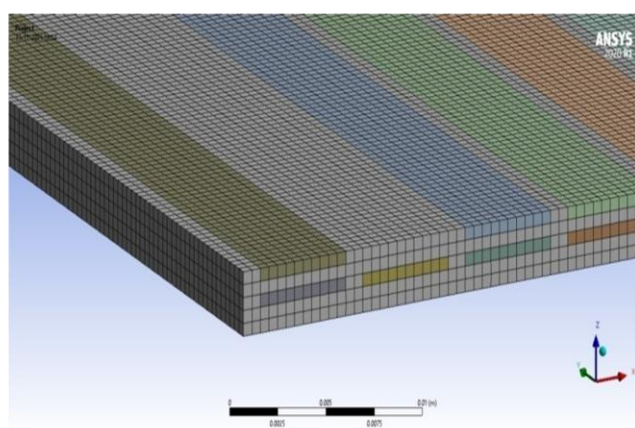
(B) Mesh – zigzag normal



(C) Mesh – zigzag Wavy



(D) Mesh – form -S-



(E) Mesh – Two stages straight channels

الشكل (5.III): التوليد الشبكي للتصميمات الهندسية الخمسة.

3.3.III. افتراضات النموذج الفيزيائي

بصفة عامة، تتغير معادلات نقل كل من الكتلة والحرارة من مكون إلى آخر في خلية الوقود، أي أن كل مكون في الخلية له معادلاته الرياضية الخاصة. في هذا العمل نعرض نمذجة ظاهرة نقل الكتلة والحرارة في خلية وقود PEMFC لعنصر لوحة التبريد.

تم نشر العديد من الأبحاث حول تدفق السوائل وانتقال الحرارة بالحمل الحراري في قنوات ميليمترية أو ميكرومترية في الأدبيات الحديثة. وذلك لتصميم مكدرات خلايا PEMFC مصغرة جداً وأكثر إحكاماً ولتحقيق نسبة طاقة كهربائية عالية. ومن ثم، فمن المستحسن أن تكون هذه القنوات في محيط النقل الحراري نشطة للتحميل الكهربائي. تساهم القنوات الصغيرة جداً (بضع ميكرومترات) في زيادة نقل الحرارة ومعادلات نقل الكتلة مما يؤدي إلى خفض درجة الحرارة القصوى للخلية مقارنة بالقنوات السنتمترية.

حتى الآن، تم تصميم عدة أشكال من قنوات تدفق السوائل النانوية. يتطلب تحسين أداء خلايا الوقود PEM أنظمة تبريد أكثر كفاءة. إلى جانب العديد من الدراسات، لوحظ أن التبريد باستخدام تدفق سوائل نانوية عبر قنوات نانوية في ألواح تصنع عادة من جرافيت الكربون أكثر كفاءة. وهنا يمكن أن نستنتج أن شكل القنوات وطبيعة تدفق الموائع النانوية لهما دور مهم جداً في تحسين أداء الخلية. في هذه العمل تمت دراسة تأثير التصميم الهندسي والسائل المتدفق بطريقة بسيطة جداً، ومن أجل تبسيط التحليل أكثر تم أخذ بعض الافتراضات في عين الاعتبار:

- تدفق السائل النانوي يكون مستمر ومستقر وغير قابل للانضغاط و صفائحي.
- يتم إهمال تأثير قوة لوحة التبريد.
- خصائص السائل ثابتة ويتم إهمال تبديد اللزوجة على القنوات.
- يكون السائل النانوي (تعلق الجسيمات النانوية Al_2O_3 في خليط W/EG) في حالة توازن حراري مع سرعة نسبية صفر و يمكن اعتباره بمثابة مرحلة واحدة.
- جميع قنوات اللوحة متطابقة في خاصية نقل الحرارة وتدفق السوائل وبالتالي تبسط المحاكاة على قناة واحدة ثم تكرر النتائج على كامل اللوحة.

4.3.III. النمذجة الرياضية والشروط الحدية

استناداً إلى الافتراضات السابقة، تم تطوير نموذج رياضي للتنبؤ وتحسين مرور التبريد في خلية PEMFC. في هذه الدراسة، تعتبر لوحة التبريد بمثابة كائن ثلاثي الأبعاد. ويكون المبرد عبارة عن سائل نانوي (Al_2O_3 : W/EG)، حيث يتدفق عبر قنوات اللوحة بشكل مستمر وثابت. تتضمن العمليات دراسة انتقال الحرارة المقترن بين الحمل الحراري القسري في تدفق السائل والتوصيل الحراري في اللوحة، حيث تم تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية الحاكمة في هذا النموذج لنقل الحرارة في كل من اللوحة الصلبة وقنوات التدفق من خلال موازنة الطاقة في حجم التحكم (Control Volume).

2.4.3.III. المعادلات الحاكمة (Governing Equation)

المعادلات الحاكمة لتدفق سائل التبريد عبر لوحة التبريد في المجال الحسابي بالإحداثيات الديكارتية (x,y,z) توصف بالمعادلات التالية [89]:

معادلة حفظ الكتلة (الاستمرارية)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1. III)$$

حيث: u ، v ، w مركبات سرعة السائل في الاتجاهات x ، y ، z على التوالي (m/s)

معادلة حفظ الزخم (كمية الحركة)

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2. III)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

حيث: ρ و μ تمثل الكثافة (Kg/m³) واللزوجة الحركية (Kg/m.s) لسائل التبريد على التوالي، P الضغط (Pa)

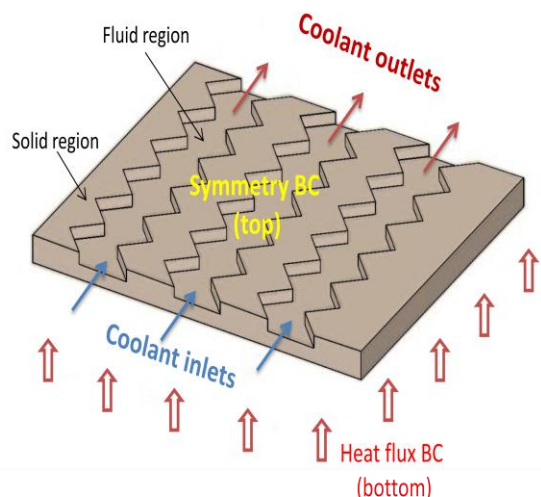
معادلة حفظ الطاقة

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3. III)$$

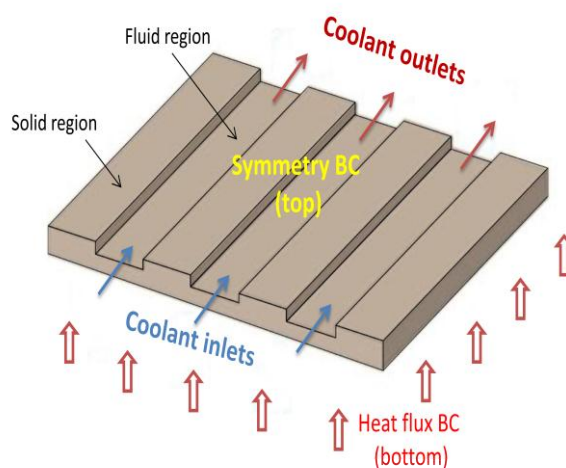
حيث: C_p الحرارة النوعية (J/Kg.K)، k الناقلية الحرارية (W/m.K)، T درجة الحرارة (K)

2.4.3.III. الشروط الحدية

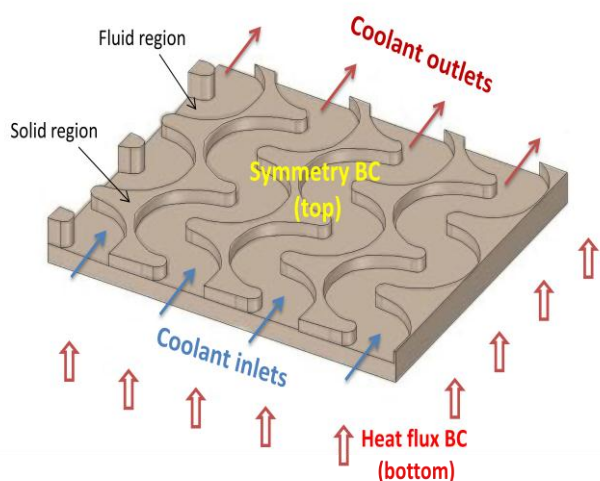
في هذا العمل كما ذكرنا سابقا، تمت الدراسة على قناة واحدة وذلك لتتشابه القنوات على طول لوحة التبريد، ومن ثم تكرر الحسابات بسهولة على كامل قنوات اللوحة. يحدد تدفق الحرارة على كل من الأسطح العلوية والسفلية للوحة عن طريق توليد الحرارة المتولدة في الخلية، حيث يتم نقل الحرارة بالتوصيل من خلال المادة الصلبة (سطح اللوحة) وتبديدها بواسطة الحمل القسري للسائل النانوي الذي يمر عبر قناة التدفق. يوضح الشكل (6.III) الشروط الحدية للنماذج الخمسة المستخدمة، كما نلخص الخصائص الفيزيائية والشروط الحدية وشروط التشغيل المستخدمة في هذه المحاكاة في الجدول (1.III).



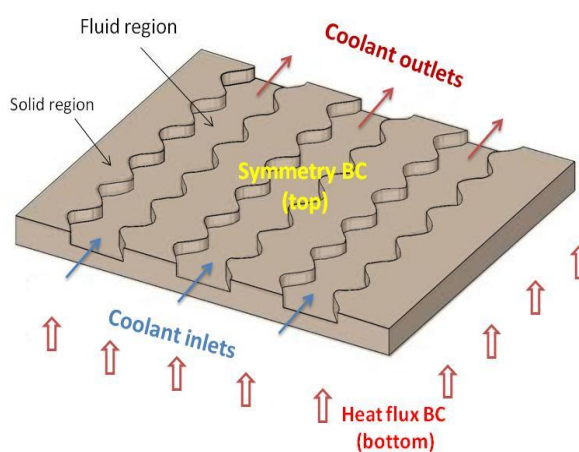
نموذج القناة المنكسرة (B)



نموذج القناة المستقيمة (A)

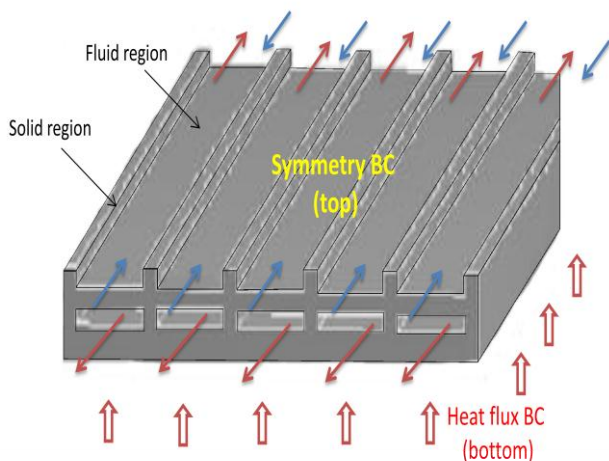


نموذج القناة S- (D)

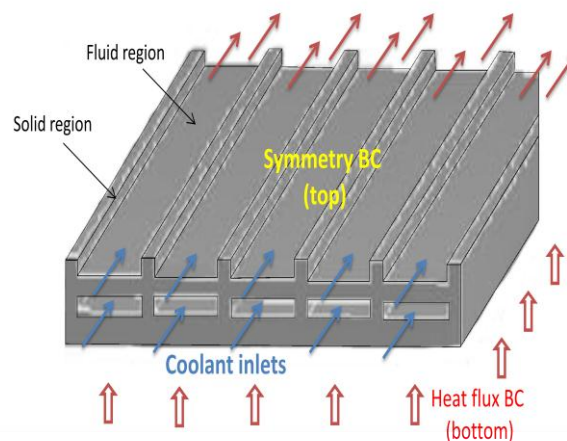


نموذج القناة المنكسرة المتموجة (C)

→ Coolant outlets → Coolant inlets



نموذج القناة Two Stages ذات التدفق المتعكس (F)



نموذج القناة Two Stages ذات التدفق المتوازي (E)

الشكل (6.III): الشروط الحدية لمحاكاة النماذج الخمسة.

تتم مراجعة معادلة حفظ الطاقة (3.III) بالنسبة للمناطق الصلبة للوحة (الجدار Wall) من خلال إعداد: $u = v = w = 0$ (عدم حركة اللوحة) مما يؤدي إلى معادلة التوصيل النقي، أي يتم وصف تلك المعادلة بالصيغة التالية:

$$k_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4. III)$$

حيث: k_s تمثل الموصلية الحرارية للوحة الجرافيتية (W/m.K)

لا يتم تطبيق شرط الحدود المنزلقة على الجدار، ويتم تطبيق سرعة ثابتة عند المدخل وضغط جوي عند المخرج كشرط حدي المعادلة (5.III).

$$\vec{V}_{wall} = 0 \quad ; \quad \vec{V}_{inlet} = Cts \quad ; \quad P_{outlet} = P_{atm} \quad (5. III)$$

يتم تسخين السطح السفلي (lower surface) للقناة بانتظام مع تدفق مستمر للحرارة (q) يكتب بـ:

$$q_{lower\ surface} = -K_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6. III)$$

حيث: K_{nf} الموصلية الحرارية للسائل النانوي (W/m.K)

تفترض درجة حرارة السطح العلوي للقناة (upper surface) ثابتة، فتصبح معادلة التدفق عند السطح العلوي:

$$q_{upper\ surface} = -K_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (7. III)$$

منذ تصنيع خلايا الوقود والدراسات المتاحة لها تم اختيار عدد رينولدز ($Re < 2300$) من قبل العديد من الباحثين، أي جريان السائل داخل قنوات التبريد يكون صفائحي. يتعلق عدد رينولدز بكثافة ولزوجة السائل النانوي وسرعته المتوسطة عند مدخل القناة وكذلك القطر الهيدروليكي (نسبة مساحة المقطع العرضي لقناة التدفق إلى محيطها المبلل)، حيث يكتب بالعلاقة [110]:

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (8. III)$$

حيث: u السرعة المتوسطة للسائل عند مدخل القناة ($m.s^{-1}$)، D_h القطر الهيدروليكي (mm).
أيضاً، يتم تقييم معامل الحمل الحراري لمائع التبريد من أجل تحديد نسبة نقل الحرارة، حيث يحدد بالعلاقة التالية [105]:

$$h = \frac{Nu K_{nf}}{D_h} \quad (9. III)$$

حيث: Nu عدد نيوست

يحدث هبوط في الضغط داخل قناة التدفق وذلك بتأثير القوة الاحتكاكية للمائع النانوي مع أسطح القناة، وهذا الهبوط في الضغط ΔP (Pa) يؤثر على طاقة الضخ W_p اللازمة لتدفق السائل النانوي داخل القنوات ويعبر عنه بالعلاقة:

$$W_p = Q_v \times \Delta P \quad (10. III)$$

حيث: Q_v معدل تدفق السائل النانوي في القناة ($m^3.s^{-1}$).

الجدول (1.III): الخصائص الهندسية والفيزيائية وشروط التشغيل المستخدمة في هذا العمل.

| القيمة | المعلمت (Parameters) |
|---|---|
| 2.5 ، 150 ، 181 5 1 1.5 0.5 0.00231 0.00091 | هندسة اللوحة الأبعاد (mm): الطول L_p ، العرض W_p ، الارتفاع H_p عرض القناة W_{ch} عرض الفاصل بين القنوات W_{rib} ارتفاع القناة H_{ch} ارتفاع قناة two stages القطر الهيدروليكي D_h لقنوات one stage D_h قناة two stages |
| 2250 690 24 | خصائص اللوحة (الجرافيت): الكثافة ρ_p (Kg/m^3) الحرارة النوعية $C_{p,p}$ ($J/Kg.K$) الموصلية الحرارية K_p ($W/m.K$) |
| 1071.432 3440.9 0.463 0.003187 | خصائص السائل النانوي nf (Al_2O_3 0.5% في W/EG): الكثافة ρ_{nf} (Kg/m^3) الحرارة النوعية $C_{p,nf}$ ($j/Kg.K$) الموصلية الحرارية K_{nf} ($W/m.K$) اللزوجة الديناميكية μ_{nf} ($Pa.s$) |
| 1365.3 4142.065 0.617 0.002128 | خصائص السائل النانوي nf (SiO_2 : 0.5% في DW): الكثافة ρ_{nf} (Kg/m^3) الحرارة النوعية $C_{p,nf}$ ($j/Kg.K$) الموصلية الحرارية K_{nf} ($W/m.K$) اللزوجة الديناميكية μ_{nf} ($Pa.s$) |
| 4000,6000,8000,10000,12000 300 | شروط التشغيل: التدفق الحراري q (W/m^2) درجة حرارة المائع عند المدخل T_{in} (K) |

5.3.III. الإجراء العددي

1.5.3.III. معالجة اقتران الضغط والسرعة

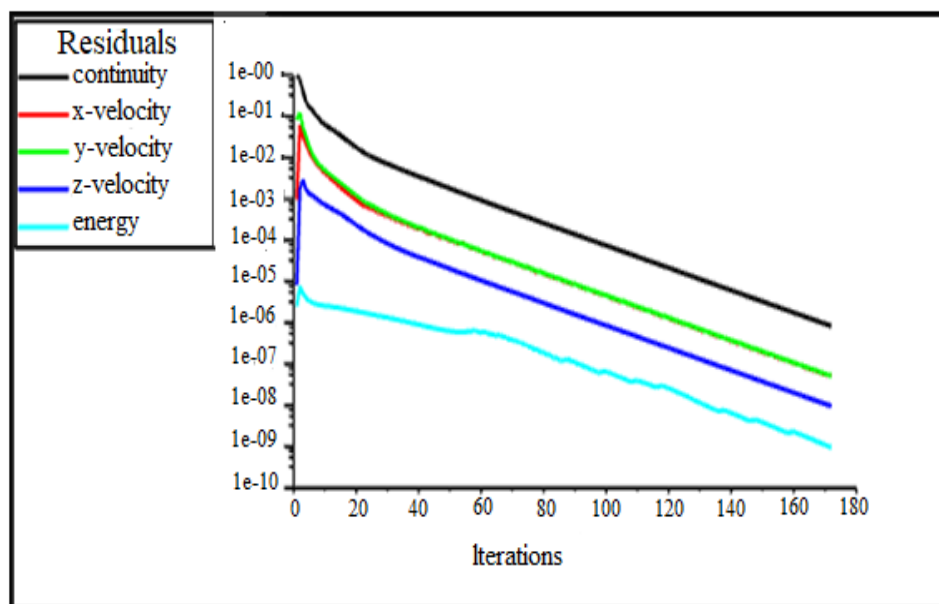
تقترن معادلة كمية الحركة (2.III) بمجال الضغط، يأتي اقتران السرعة والضغط لعدم وجود معادلات واضحة تحكم مجال الضغط، ومن هنا يتطلب الحاجة إلى استخدام خوارزمية محددة لإجراء هذه العملية. يوفر كود "CFD – Ansys Fluent" أربع طرق لاقتران السرعة والضغط، وفي محاكاة هذا العمل استخدمنا خوارزمية SIMPLE لضمان دقتها الجيدة في الحل.

2.5.3.III. مخطط التقدير

في برنامج "Ansys Fluent" يتم حساب جميع المتغيرات في مركز العناصر الشبكية وحساب التدفقات على الأوجه، وبالتالي يتطلب معرفة قيمة المتغير على هذا الوجه، لذلك يجب علينا إجراء الاستيفاءات بين القيم المجاورة المعروفة. تتوفر العديد من مخططات التقدير في هذا البرنامج، وفي محاكائنا ولزيادة استقرار الحل اعتمدنا على مخطط "upwind من الدرجة الثانية" للتقدير المكاني لمعادلات الزخم والطاقة، في حين تم تطبيق المخطط القياسي "Standard" لتقدير الضغط.

3.5.3.III. معيار التقارب

يعتمد التقارب على متوسط القيمة المطلقة للمتبقّي لكل معادلة حفظ. عند نهاية كل تكرار يتم حساب المتبقّي من كل متغير من المتغيرات المحتفظ بها ويتوقف الحساب عندما تكون جميع البقايا أقل من معيار التقارب. يختلف عدد التكرارات للوصول إلى التقارب إلى متغير إلى آخر حيث نرى بشكل عام وبالنسبة لكل عمليات محاكاة هذا النموذج أنّ البقايا تكون أقل من 10^{-6} لتدفق الكتلة، و 10^{-7} لمعادلة الزخم (السرعة والضغط)، و 10^{-9} لمعادلة الطاقة.



الشكل (7.III): تقييم المخلفات (البقايا) خلال تكرارات الحساب لهذا العمل.

4.5.3.III. اختبار استقلال الشبكة (Grid Independence Test)

في هذا العمل، تم إجراء اختبار استقلال الشبكة المنهجي للتأكد من أن النتائج العددية مستقلة عن رقم الشبكة، ومن أجل ضمان دقة النماذج الخمسة. تم استخدام محاكاة CFD لبناء الشبكة المصممة، حيث يتم توزيع الشبكة بشكل موحد وتكون التدرجات صغيرة نسبيًا كالاتجاه المحيطي بالنسبة للمدخل والمناطق القريبة من الجدار (المناطق الصلبة للوحة). تكون الشبكة أكثر دقة لالتقاط مجالات السرعة ودرجة الحرارة بشكل أكثر وضوحًا ودقة. تركز هذه الدراسة على خصائص نقل الحرارة وهبوط الضغط للسائل النانوي في قنوات ألواح التبريد، لذلك يعتبر نقل الحرارة وهبوط الضغط بمثابة حكم حاسم على استقلالية الشبكة.

تم إنشاء خمسة أنظمة شبكية مختلفة لنموذج القنوات المستقيمة العادية (One Stages). يتم عرض نتائج هبوط الضغط ΔP ودرجة حرارة السطح القصوى T_{max} في الجدول (2.III). يمكن ملاحظة أن اختلاف النتائج بين الرقم 3 والرقم 4 للشبكة صغير جدًا، وبالتالي يتم استخدام عدد العناصر الشبكية (513836) في هذا التصميم.

الجدول (2.III): اختبار استقلال الشبكة للتصميم المستقيم.

| $T_{max}(K)$ | $\Delta P(Pa)$ | عدد العناصر الشبكية |
|--------------|----------------|---------------------|
| 312.14 | 1101.02 | 58565 |
| 311.03 | 1112.9 | 101307 |
| 310.9 | 1123.51 | 313836 |
| 310.5 | 1134.06 | 583900 |
| 310.4 | 1134,1 | 905750 |

يتم عرض نتائج ΔP و T_{max} وعلاقتها بالتقسيم الشبكي لنموذج القنوات المنكسرة (Zigzag) في الجدول (3.III)، حيث تم إنشاء خمسة أنظمة شبكية مختلفة. في هذا النموذج (B) تجاوز عدد الخلايا 800,000، وذلك نظرًا لأن مناطق الانحناء ذات هياكل التدفق المعقدة تتطلب كثافة شبكة أعلى. لوحظ أن اختلاف النتائج بين الرقم 4 والرقم 5 للشبكة صغير جدًا، ومنه يتم الاعتماد على عدد العناصر الشبكية (801900) في هذا النموذج.

الجدول (3.III): اختبار استقلال الشبكة للتصميم المنكسر العادي (B).

| $T_{max}(K)$ | $\Delta P(Pa)$ | عدد العناصر الشبكية |
|--------------|----------------|---------------------|
| 309.084 | 1584.2 | 63508 |
| 308.638 | 1631.6 | 399017 |
| 308.141 | 1712.42 | 536570 |
| 307.904 | 1806.09 | 801900 |
| 307.898 | 1809 | 1005750 |

تم إنشاء خمسة أنظمة شبكية مختلفة لنموذج القنوات المنكسرة المتموجة، تم عرض نتائج ΔP و T_{max} في الجدول (4.III). يمكن ملاحظة أن اختلاف النتائج بين الرقم 4 والرقم 5 للشبكة صغير جدًا وبالتالي يتم استخدام عدد العناصر الشبكية (813901) في هذا التصميم.

الجدول (4.III): اختبار استقلال الشبكة للتصميم المنكسر المتموج (C).

| $T_{max}(K)$ | $\Delta P(Pa)$ | عدد العناصر الشبكية |
|--------------|----------------|---------------------|
| 309.184 | 2310 | 64002 |
| 308.638 | 2400,8 | 255340 |
| 308.041 | 2490 | 504421 |
| 307.154 | 2601.9 | 813901 |
| 307.108 | 2606.1 | 1905750 |

تم إنشاء ستة أنظمة شبكية مختلفة لنموذج القنوات على شكل حرف S-. تم عرض نتائج ΔP و T_{max} في الجدول (5.III). يمكن ملاحظة أن اختلاف النتائج بين الرقم 4 والرقم 5 للشبكة صغير جدًا، يتم استخدام عدد العناصر الشبكية (999804) في هذا النموذج.

الجدول (5.III): اختبار استقلال الشبكة للتصميم S-.

| $T_{max}(K)$ | $\Delta P(Pa)$ | عدد العناصر الشبكية |
|--------------|----------------|---------------------|
| 307.084 | 2204,8 | 94240 |
| 306.238 | 2267 | 368837 |
| 305.941 | 2298.7 | 743836 |
| 305.244 | 2311.09 | 999804 |
| 305.208 | 2311.7 | 1200170 |
| 305.20 | 2312..2 | 1650911 |

تم إنشاء تسعة أنظمة شبكية مختلفة لنموذج القنوات المستقيمة ذات طبقتين (Two Stages) ولتدفق السوائل ذات التيار المتوازي (Co-Current). يتم عرض النتائج المقابلة لهبوط الضغط ΔP ودرجة الحرارة القصوى T_{max} في الجدول (6.III). ويمكن ملاحظة أن اختلاف النتائج بين الرقم 7 والرقم 8 للشبكة صغير جدًا، وبالتالي يتم استخدام عدد العناصر الشبكية (916464) في هذه الدراسة.

الجدول (6.III): اختبار استقلال الشبكة للتصميم (Two Stages).

| $T_{max}(K)$ | $\Delta P(Pa)$ | عدد العناصر الشبكية |
|--------------|----------------|---------------------|
| 307.084 | 3187.37 | 74240 |
| 306.638 | 3238.85 | 168837 |
| 306.741 | 3260 | 243836 |
| 306.604 | 3279 | 313900 |
| 306.578 | 3297 | 405750 |
| 306.552 | 3312.45 | 543000 |
| 305.454 | 6426.19 | 916464 |
| 305.453 | 6426.39 | 1072560 |
| 305.482 | 6426 | 8855241 |

4.III. التحقق من صحة النموذج (Model Validation)

عند تطوير وتنفيذ نماذج رياضية للتنبؤ بسلوك PEMFC قيد التشغيل، يحتاج المستخدم إلى إيفاء اهتمام خاص للتحقق من الصحة بسبب التعقيد المتأصل للظواهر الفيزيائية والكيميائية المقترنة داخل الطبقات الوظيفية المختلفة لكل خلية في المكسد. وللتحقق من صحة النموذج العددي لهذا العمل، قمنا بمقارنة النتائج المتحصل عليها مع تلك التي حصل عليها [84] Beak et al. و [111] Zakaria et al، وأيضا عمل [97] Li and Sundén.

تم عرض المقارنة بين النموذج الحالي ونموذج Beak et al في الجدول (7.III)، وذلك من حيث تغيرات درجات الحرارة (درجة الحرارة القصوى T_{max} ومتوسط درجة الحرارة T_{avg} والفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا ΔT)، بدلالة قيم مختلفة للتدفق الحجمي Q_V (m^3/s) للسائل: 2×10^{-6} ، 4×10^{-6} و 6×10^{-6} ، وجدنا الخطأ النسبي 0.1% بالنسبة لـ T_{max} و 0.3% بالنسبة لـ T_{avg} و يتراوح بين 1.56% و 3.09% بالنسبة لـ ΔT .

الجدول (7.III): مقارنة النموذج الحالي مع عمل Baek et al.

| | ΔT (K) | | | T_{avg} (K) | | | T_{max} (K) | | |
|--------------------------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| | Beak et al [26] | Present study | Relative error | Beak et al [26] | Present study | Relative error | Beak et al [26] | Present study | Relative error |
| $Q_V = 2 \times 10^{-6} m^3/s$ | 39.843 | 38.608 | 3.09 | | | | | | |
| $Q_V = 2 \times 10^{-6} m^3/s$ | 21.188 | 20.653 | 2.52 | | | | | | |
| $Q_V = 2 \times 10^{-6} m^3/s$ | 14.696 | 14.925 | 1.56 | 322.96 | 323.94 | 0.3 | 314.36 | 314.66 | 0.1 |

وتم عرض المقارنة من حيث هبوط الضغط ΔP (Pa) ومعامل النقل الحراري h ($W/m^2 \cdot K$) وعدد نيوستل Nu بدلالة أرقام مختلفة لرينولدز Re لتوضيح كفاءة نقل السائل للحرارة عبر السطح، وذلك مع عمل [111] Zakaria et al في الجدول (8.III)، حيث وجد أن عند $(Re=120)$ بلغ الخطأ النسبي 9.67% لـ ΔP بينما بلغ 0.7% عند $(Re=50)$ ، وتقدر الأخطاء النسبية للحمل الحراري بـ 0.41% و 5.49% عند $(Re=120)$ و $(Re=20)$ على التوالي، وبالنسبة لـ Nu عند $(Re=100)$ يقدر الخطأ النسبي بـ 5.95% ويصل الخطأ إلى 0.097% عند $(Re=80)$.

الجدول (8.III): مقارنة النموذج الحالي مع عمل Zakaria et al.

| | ΔP (Pa) | | | h ($W/m^2 \cdot K$) | | | Nu | | |
|----------|-------------------|---------------|----------------|-------------------------|---------------|----------------|-------------------|---------------|----------------|
| | Zakaria et al[24] | Present study | Relative error | Zakaria et al[24] | Present study | Relative error | Zakaria et al[24] | Present study | Relative error |
| $Re=120$ | 2170 | 1960 | 9.67 | 1224.561 | 1219.512 | 0.41 | 4.558 | 4.57 | 0.26 |
| $Re=100$ | 1943.455 | 1813.26 | 6.69 | 1171.93 | 1112.49 | 5.07 | 4.364 | 4.12 | 5.59 |
| $Re=80$ | 1791.273 | 1616 | 9.78 | 1100 | 1086.97 | 1.18 | 4.096 | 4.1 | 0.097 |
| $Re=60$ | 1580.182 | 1502 | 4.95 | 1112.281 | 1124 | 1.053 | 4.143 | 4.2 | 1.38 |
| $Re=40$ | 1467.273 | 1457 | 0.7 | 1107.018 | 1133.787 | 2.42 | 4.123 | 4.25 | 3.1 |
| $Re=20$ | 1275.818 | 1158 | 9.23 | 1056.14 | 1114.1 | 5.49 | 3.949 | 3.85 | 2.5 |

يعرض الجدول (9.III) مقارنة النموذج الحالي بنموذج Li and Sundén، وذلك من حيث مؤشر توحيد درجة حرارة U_T ، وهبوط الضغط ΔP ، وفرق درجة الحرارة ΔT ، تقدر الأخطاء النسبية بـ 3.68% و 1.18% و 4.59% عند $(Re=250)$ على التوالي.

الجدول (9.III): مقارنة النموذج الحالي مع عمل Li and Sundén.

| | U_T (K) | | | ΔP (Pa) | | | ΔT (K) | | |
|--------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|
| | Li and Sundén [27] | Present study | Relative error | Li and Sundén [27] | Present study | Relative error | Li and Sundén [27] | Present study | Relative error |
| Re=250 | 1.765 | 1.71 | 3.68 | 200.96 | 200.9443 | 1.18 | 8.283 | 7.902 | 4.59 |

5.III. خلاصة

تم في هذا الفصل تقديم شرح مفصل لتنفيذ نموذج عددي (ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) لدراسة نقل الحرارة و تغيرات الضغط في ألواح تبريد خلية الوقود PEMFC وتأثيرها على الأداء الكلي للخلية. تمت نمذجة العمل ببرنامج "Ansys Fluent" بواسطة جهاز كمبيوتر يحتوي على معالج: Intel® Core (i5-CPU 2.27GHz)، وذاكرة (RAM) ذات سعة 8GB، ونظام مثبت 64bit. تم تقديم خمسة تكوينات هندسية مختلفة لقنوات تدفق السائل، وتم عرض الشبكة المستخدمة لكل تصميم مع ذكر الافتراضات الفيزيائية والشروط الحدودية المستخدمة. أجريت اختبارات شبكية مختلفة لإظهار أن النتائج العددية مستقلة عن رقم الشبكة. تم اختيار مخطط "UpWind" من الدرجة الثانية للسرعة، والمخطط القياسي "Standard" للضغط، وذلك لتناسبهما مع هذا النموذج لتوفير نتائج أكثر تقاربا واستقرارا. كذلك أجري تحقق من صحة هذا النموذج مع ثلاثة أعمال سابقة. تتم معالجة النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها في الفصل التالي.

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

1.IV. مقدمة

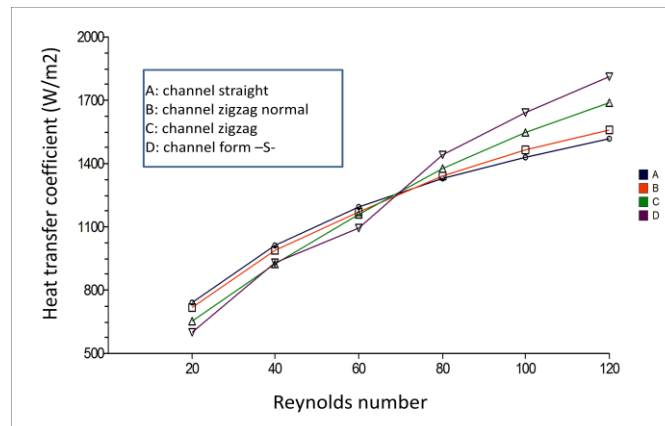
بعد التحقق من صحة النموذج مع الدراسات التجريبية التي أجراها كل من Beak et al [84] و Zakaria et al [111]، وأيضا Li and Sundén [97] بالنسبة لحقل تدفق السائل النانوي (المستقيم العادي) في ألواح تبريد PEMFC التي تم عرضها في الفصل السابق، فإن الهدف من هذا الفصل هو عرض النتائج الرئيسية لعمليات المحاكاة العددية بأداة ديناميكا الموائع الحسابية باستخدام برنامج Ansys Fluent التي تم الحصول عليها. نقدم مقارنة jrvdfd, بين التصميمات الأحادية (One Stage) من حيث خصائص ومعامل النقل الحراري والضياع الطاقوي، من ثم نعرض المقارنة بين القناتين المستقيمة العادية الأحادية والمستقيمة المزدوجة (Two stages)، كما نقدم دراسة تأثير طبيعة السائل واتحة تدفقه داخل القنوات المزدوجة.

2.IV. دراسة التصميمات الأحادية (One Stage)

تمت نمذجة أربعة ألواح تبريد ذات تصميمات أحادية التدفق مختلفة الشكل، معرضة لتدفق حراري ثابت يقدر بـ 4000W/m^2 لدراسة ومقارنة تأثير التصميم على أداء التبريد لخلية وقود PEMFC.

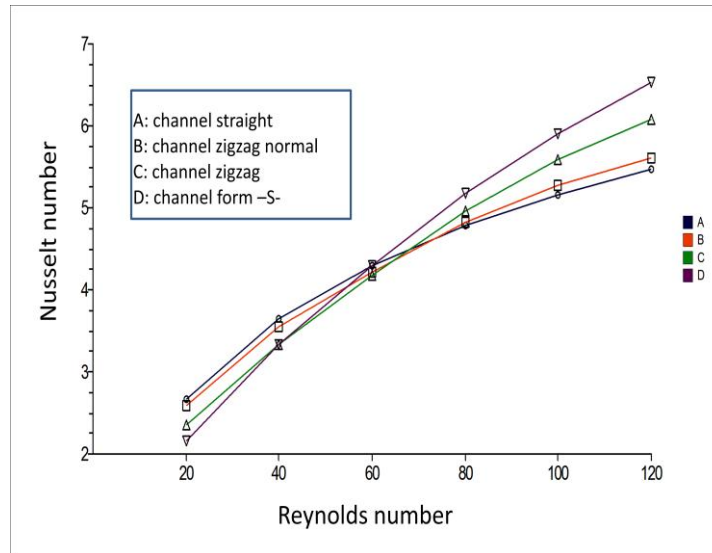
1.2.IV. تأثير التصميم الهندسي على معامل الحمل الحراري

تمت دراسة نقل الحرارة عبر السائل النانوي (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) على أساس كل من معامل نقل الحرارة h وعدد نيوستل Nu . يوضح الشكل (1.IV) تباين معامل نقل الحرارة بدلالة عدد رينولدز Re . لوحظ أنه مع زيادة تركيز حجم تدفق المائع وعدد Re قد تحسن نقل الحرارة. تتميز قنوات التدفق التصميمية: القناة المنكسرة العادية (النموذج B)، القناة المنكسرة المتموجة (النموذج C)، القناة على شكل حرف S- (النموذج D) بمعامل نقل حراري أعلى مقارنة بقناة التدفق المستقيمة العادية (النموذج A) عند Re الأكبر من 70، ولكن بالقرب من ($Re=70$) فإن معامل انتقال الحرارة للقنوات (B,C,D) أقل من القناة المستقيمة. كذلك لوحظ أن قناة التدفق S- تتميز بأعلى معامل نقل للحرارة مقارنة بالنماذج (B,C) ومع معدل تعزيز حراري يصل إلى 19.3% مقارنة بالنموذج (A)، وذلك راجع لأن شكل المسار الهندسي S- يتسبب في زيادة وقت وصول السائل مما أدى إلى حدوث زيادة قيمة المعامل h عند Re المرتفع.



الشكل (1.IV): تباين معامل النقل الحراري (h) بدلالة رينولدز (Re) للنماذج الأحادية الأربعة للسائل النانوي (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40).

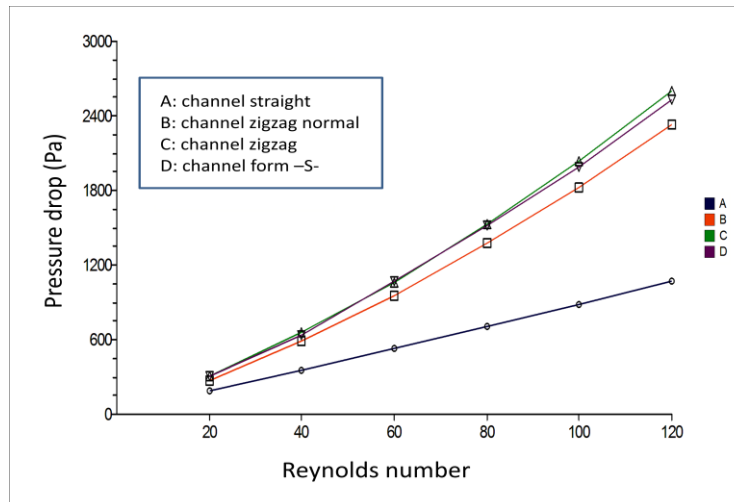
تم استخدام معامل انتقال الحرارة h لحساب عدد نيوستل Nu . بشكل عام، عدد Nu يزداد خطياً مع عدد Re . عند رينولدز أكبر من 60 يظهر تأثير انحناء حدود القناة للتصميمات المتعرجة (B,C,D)، حيث هذا الانحناء يسبب في زيادة معامل النقل الحراري مقارنة بالحدود المستقيمة. كما هو موضح في الشكل (2.IV)، لوحظ أنه أعلى عدد نيوستل يظهر عند تصميم القناة -S- وبمقارنته بالقناة المستقيمة وُجد أنه ارتفع بنسبة 19.2%، ثم تليها القناة المنكسرة المتموجة (C) بنسبة تعزيز 11.5% تليها القناة المنكسرة (B) بنسبة 2.56%.



الشكل (2.IV): تغيرات عدد نيوستل Nu بدلالة عدد Re للنماذج الأحادية الأربعة للسائل النانوي (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$).

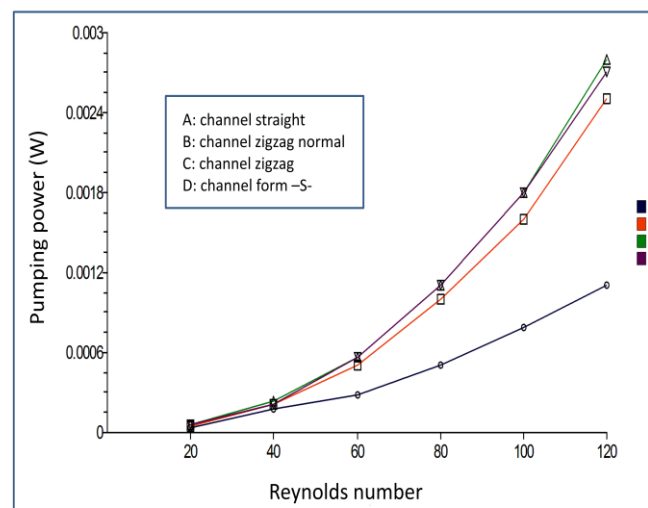
2.2.IV. تأثير التصميم الهندسي على الضياع الطاقوي

تم قياس هبوط الضغط ΔP للسائل ($Al_2O_3:0.5\%$ في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) بين مدخل ومخرج قنوات التدفق للنماذج الأربعة (A,B,C,D) لحساب متطلبات طاقة الضخ W_p وتأثيرها على الأداء الكهروحراري لخلية PEMFC. يمثل الشكل (3.IV) تباين هبوط الضغط بدلالة أرقام رينولدز التي تتراوح بين 20 و120 للنماذج الأحادية الأربعة، حيث لوحظ زيادة خطية في هبوط الضغط برقم رينولدز المدخل. تم التنبؤ بهبوط ضغط العالي، وذلك عند تدفق السائل النانوي المبرد عبر القنوات الضيقة للوحة التبريد. تم الحصول على أعلى هبوط ضغط قدر بـ 1537.28 Pa عند القناة المنكسرة المتموجة (C) عند رقم رينولدز 120 مقارنة بالقناة المستقيمة (A). تليها القناة -S- (النموذج D) يحدث فيها ارتفاع في الهبوط يصل إلى 1464.06 Pa، لاحظنا أيضاً زيادة عالية في هبوط الضغط للقناة المنكسرة العادية (النموذج B) قدرت بـ 1269.34 Pa نسبة إلى القناة المستقيمة. إن الهبوط المرتفع في الضغط للنماذج (B,C,D) راجع لتأثر سائل التبريد بالحدود المتعرجة لقنوات التدفق التي تعيق مساره بين المدخل والمخرج وكلما زاد الانعراج لاحظنا زيادة في الضياع الطاقوي.



الشكل (3.IV): تغيرات هبوط الضغط (ΔP) بدلالة (Re) للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنماذج الأحادية الأربعة.

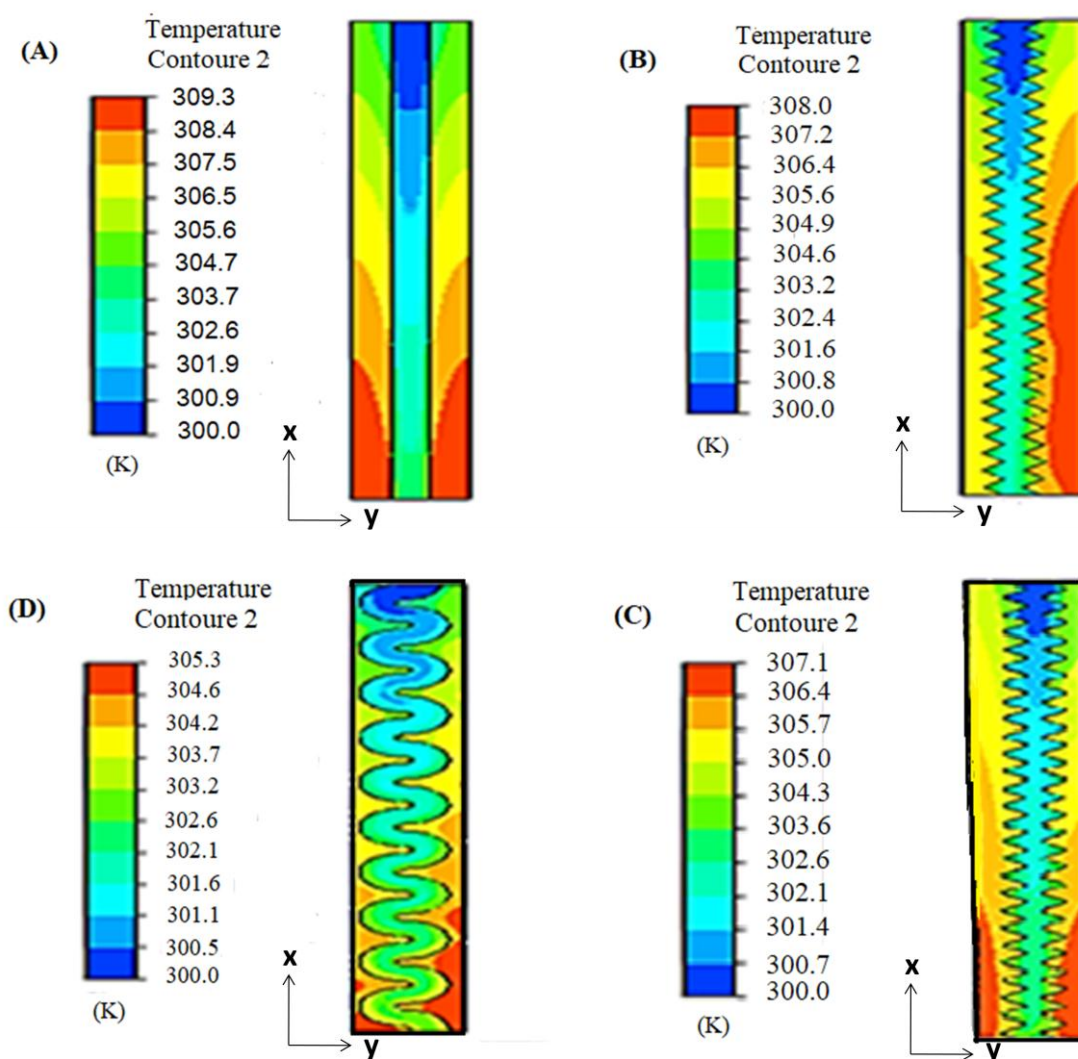
يظهر في الشكل (4.IV) تأثيرات طاقة الضخ لقنوات التدفق (B,C,D) مقارنة بالقناة المستقيمة العادية (A) عند رينولدز أكبر من 40. إن الزيادة المرتفعة في هبوط الضغط تؤدي إلى زيادة متطلبات طاقة الضخ مما يؤدي إلى زيادة الحاجة في إضافة الجسيمات النانوية (Al_2O_3) في سائل التبريد، وهذا ما يسبب مشكل في نظام تبريد خلية PEMFC. لوحظ أنه عند رينولدز 120 أدت قناة التدفق المنكسر المتموج (C) إلى قوة ضخ إضافية قدرها $0.00017W$ مقارنة بالقناة المستقيمة، وكانت قوة الضخ لقناة التدفق -S- تساوي $0.0016W$ ، تليها القناة المنكسرة (النموذج B) بمعدل إضافة قدره $0.0014W$. ترجع الزيادة في طاقة الضخ إلى الهبوط المرتفع في ضغط السائل بين مدخل ومخرج القناة التدفق (B,C,D). إن متطلبات طاقة الضخ العالية ليست مناسبة لكفاءة خلايا الوقود لأن ذلك من شأنه أن يزيد من الخسائر أي يتطلب على نظام التبريد إضافة عناصر معملية أخرى فتأثر على وزن ومتانة وأداء الخلية.



الشكل (4.IV): تغيرات طاقة الضخ للسائل النانوي (خليط $Al_2O_3: 0.5\% - W:60/EG:40$) للنماذج الأحادية الأربعة بدلالة (Re).

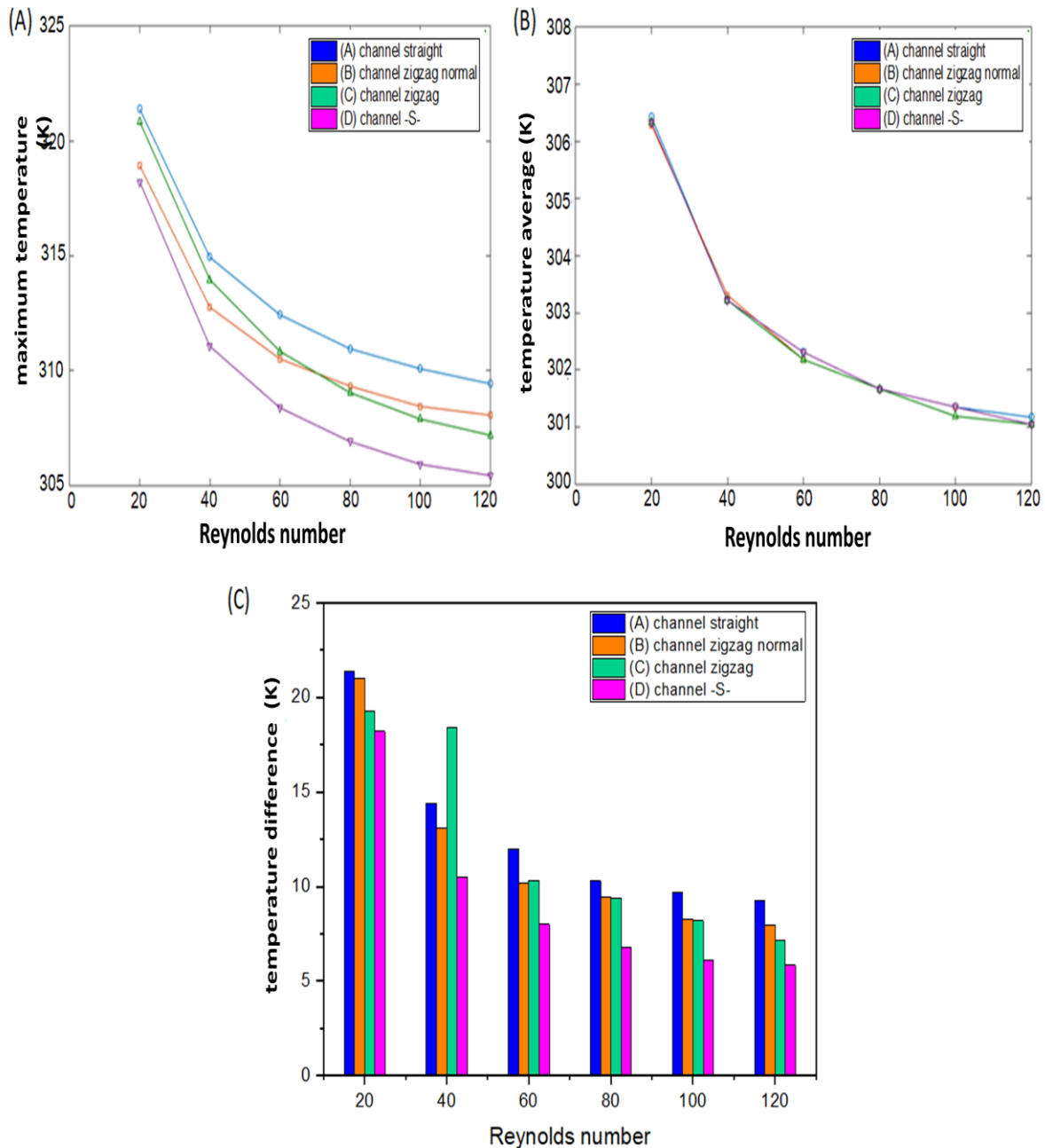
3.2.IV. خصائص التوزيع الحراري

إن دور لوحة التبريد في خلية PEMFC يتمثل في منع الإنهاك وإستنفاد الحرارة المتولدة الزائدة وفي الوقت نفسه تساهم في الحفاظ على تجانس درجة الحرارة (درجة حرارة موحدة) في جميع أنحاء المنطقة النشطة، يوضح الشكل (5.IV) نتائج محاكاة توزيع درجة الحرارة على مستوى لوحة قنوات تدفق السائل النانوي (Al₂O₃:0.5% في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) عند (Re=120). تم ملاحظة تطور درجة حرارة سائل التبريد النانوي على طول قناة التدفق وتوزيع درجة الحرارة في المنطقة الصلبة للوحة بشكل عام. لوحظ تزايد درجة حرارة السائل على طول قنوات التدفق وذلك بسبب امتصاصه للحرارة المتولدة في الخلية (التدفق الحراري المستمر للسطح)، حيث تكون درجة الحرارة أقل قيمة قرب المدخل وأعلى قيمة قرب مخرج القناة. كما لوحظ أيضا أن درجة حرارة اللوحة تتزايد على طول القناة وذلك بسبب تناقص قدرة السائل النانوي في التبريد. كما وضح أنه هناك اختلاف ضعيف في درجة الحرارة المحلية للسائل النانوي في ألواح التبريد مع التصميمات (A,B,C,D) المختلفة لمجال تدفق المائع.



الشكل (5.IV): توزيع درجة حرارة اللوحة (المنطقة الصلبة ومنطقة السائل النانوي) للنماذج الأحادية الأربعة (A,B,C,D) عند (Re=120).

لضمان الاستقرار الحراري لخلية PEMFC من الضروري التحكم في درجة حرارة السطح القصوى T_{max} للوحة التبريد عند مستوى معين، في الواقع تعتبر T_{max} أهم عامل في منع الضرر الحراري للخلية. وفقاً للشكل (6.IV) تكون درجة حرارة السطح القصوى للقناة -S- حوالي 4K أقل من النموذج (A) تليها القناة (C) بنقصان 2.12K ثم القناة (B) بنقصان 1.28K، ومن ناحية أخرى يكون الفرق في درجة حرارة السطح ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$) لقنوات التدفق (B,C,D) أقل من قناة التدفق المستقيمة بحيث تتفوق بفرق (4K). كما نلاحظ تطابق في قيم متوسط درجة حرارة السطح (T_{avg}) للنماذج الأحادية الأربعة مع تغير طفيف عند عدد رينولدز 120 أقل من التصميم المستقيم العادي (A).



الشكل (6.IV): خصائص النقل الحراري للنماذج الأحادية الأربعة بدلالة رينولدز: (A) درجة الحرارة القصوى (B) متوسط درجة الحرارة، (C) الفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا.

4.2.IV. مؤشر تجانس درجة الحرارة

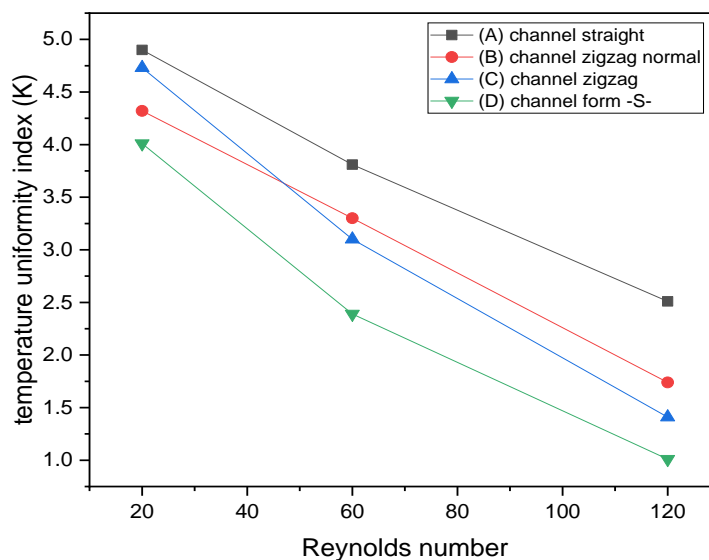
للمزيد من المقارنة الكمية لأداء تبريد خلية PEMFC تمّ تعريف مؤشر توحيد درجة الحرارة (U_T) على أنه مؤشر قياس تجانس توزيع درجة الحرارة. ومن الناحية الكمية يعرف U_T بأنه انحراف درجة حرارة السطح T عن متوسط درجة الحرارة T_{avg} عند السطح الناقل للحرارة، وبمعنى آخر تصبح U_T قريبة من القيمة صفراً عندما يكون توزيع درجة الحرارة أكثر تجانساً، حيث نعبر عنه بالعلاقة الرياضية التالية: [111,110]:

$$U_T = \frac{\int T - T_{avg} dA}{\int dA} \quad (1.IV)$$

حيث: A مساحة السطح (mm^2)، و T_{avg} تمثل متوسط درجة الحرارة لمساحة السطح بأكملها وتكتب بالعلاقة:

$$T_{avg} = \frac{\int T dA}{\int dA} \quad (2.IV)$$

يظهر الشكل (7.IV) مؤشر تجانس درجة الحرارة U_T للسائل النانوي المتدفق في ألواح تبريد خلية PEMFC (خليط W:60/EG:40 - Al_2O_3 : 0.5%) للنماذج الأحادية الأربعة بدلالة رينولدز، حيث لوحظ أن القنوات S- (النموذج D) تتميز بتوزيع درجة حرارة أكثر تجانساً مقارنة بالقناة المستقيمة، حيث تبلغ قيمة المؤشر في هذا النموذج 0.82K عند رينولدز 120 ثم تليها القنوات المنكسرة المتموجة (النموذج C) بـ 1.21K ثم المنكسرة بـ 1.72K (النموذج B). يلخص الجدول (1.IV) النتائج العددية للنماذج الأحادية الأربعة عند رينولدز 120.



الشكل (7.IV): مؤشر تجانس درجة الحرارة للسائل (خليط W:60/EG:40 - Al_2O_3 : 0.5%) للنماذج الأحادية الأربعة بدلالة (Re).

الجدول (1.IV): ملخص النتائج العددية للنماذج الأحادية الأربعة (A,B,C,D) للسائل النانوي خليط (Al₂O₃: 0.5% - W:60/EG:40) عند (Re=120).

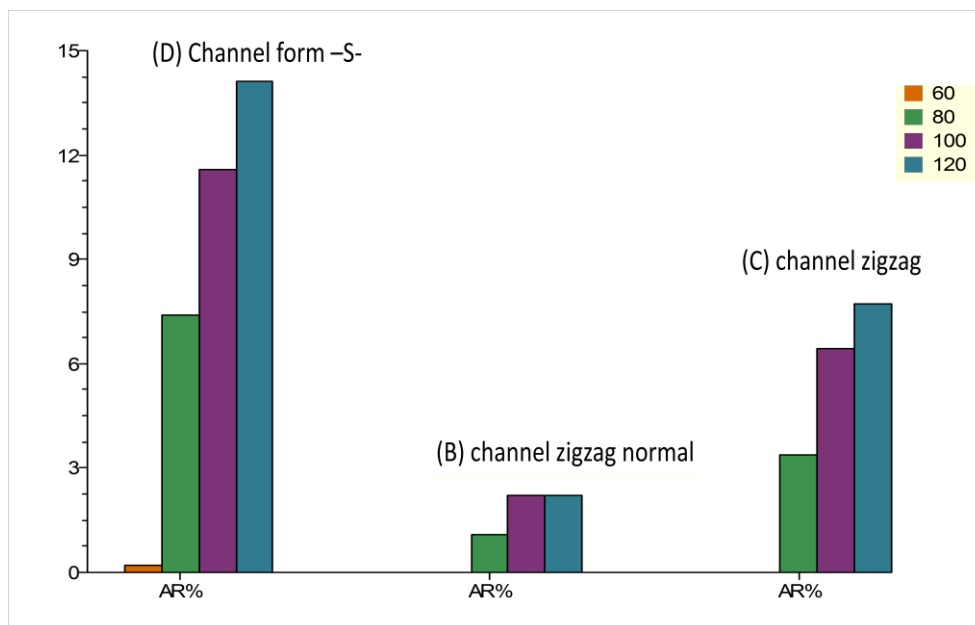
| النموذج | T _{max} (K) | ΔT(K) | U _T (K) | AR% |
|-----------------|----------------------|-------|--------------------|------|
| المستقيم العادي | 309.27 | 7.2 | 2.34 | / |
| المنكسر العادي | 307.99 | 7.99 | 1.72 | 14.1 |
| المنكسر المتموج | 307.15 | 7.15 | 1.41 | 7.72 |
| الشكل -S- | 305.3 | 5.3 | 0.82 | 2.21 |

4.3.III. نسبة الفائدة (Advantage Rate)

من خلال دراسة متوسط درجة حرارة السطح T_{avg} لم نلاحظ فرق ظاهر في قنوات التدفق المتعرجة (B,C,D) مقارنة بالقناة المستقيمة (A)، ولإثبات صحة علاقة مؤشر تجانس درجة الحرارة (U_T) اعتمدنا على نسبة الفائدة لمعرفة مجال التدفق الأنسب لتبريد خلية PEMFC حيث نعبر عنها بالعلاقة [112]:

$$AR = \frac{\frac{h_i - h_A}{h_A}}{\frac{\Delta P_i - \Delta P_A}{\Delta P_A}} ; \quad i = B, C, D \quad (3. IV)$$

تم عرض نتائج نسبة الفائدة للنماذج المتعرجة (B,C,D) في الشكل (8.IV)، حيث نلاحظ أن قناة التدفق -S- (النموذج D) تظهر فائدتها عند عدد رينولدز 60 فما فوق بحيث تصل عند رينولدز 120 إلى أعلى نسبة فائدة تقدر بـ 14.2% مقارنة بالقناة المستقيمة، وتليها القناة المنكسرة المتموجة (C) ثم القناة المنكسرة العادية (النموذج B)، بحيث تظهر فائدتهما عند (Re=80) فما فوق بنسبة فائدة تصل 7.72% و 2.21% على التوالي مقارنة بالمستقيمة.



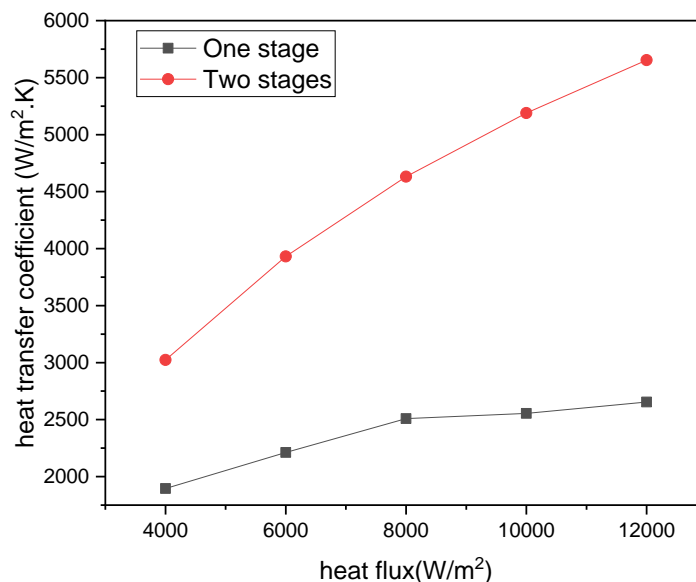
الشكل (8.IV): نسبة الفائدة (AR) للنماذج الأحادية المتعرجة (B,C,D) بالنسبة للنموذج المستقيم (A) للسائل خليط (Al₂O₃: 0.5% - W:60/EG:40).

3.IV. دراسة التصميم المزدوج (Two Stages)

عند تصميم أشكال مختلفة عن القناة المستقيمة والمتمثلة في: تصميم منكسر عادي (النموذج B) وتصميم منكسر متموج (النموذج C) وتصميم S- (النموذج D) آلت الفكرة إلى تصميم جديد تمثل في تقسيم القناة عرضياً إلى طبقتين (Two Stages) معبر عنها في الفصل السابق بالنموذجين (E,F). في هذا العمل تمت دراسة تقسيم القناة المستقيمة فقط ونُمدجت المحاكاة لتوضيح مدى نقل هذا التصميم للحرارة، كما تمت دراسة مقارنة بين التدفق المتوازي والمعاكس للسائل (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وايتيلين جلايكول:40) والسائل (0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) من حيث خصائص النقل والتوزيع الحراري من أجل الحصول على أداء حراري جيد لتبريد خلية PEMFC.

1.3.IV. تأثير التصميم المستقيم المزدوج على معامل الحمل الحراري

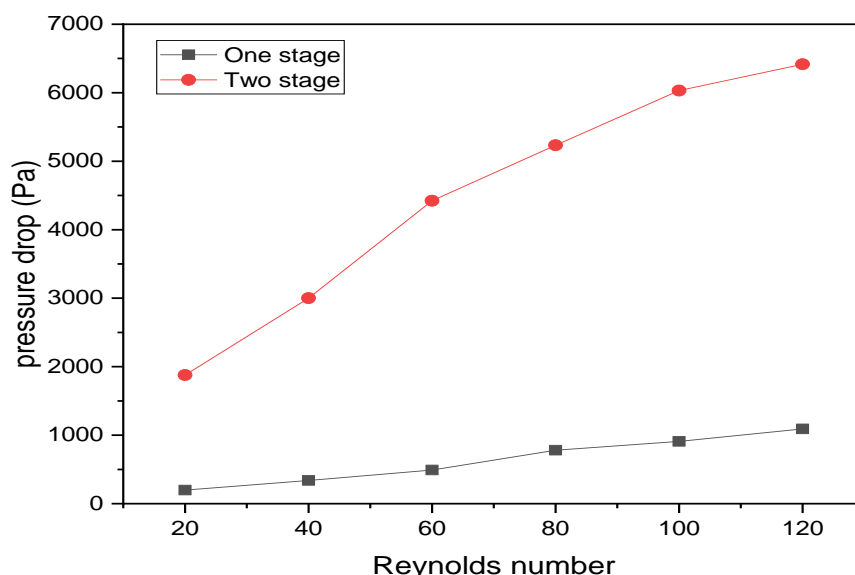
تمت دراسة انتقال الحرارة عبر السائل النانوي (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وايتيلين جلايكول:40) في لوحة تبريد ذات قنوات مزدوجة (Two stages) على أساس معامل نقل الحرارة h بأخذ عدد رينولدز 120. يوضح الشكل (9.IV) تباين معامل نقل الحرارة بدلالة التدفق الحراري q ، حيث لوحظ أنه مع زيادة تركيز التدفق الحراري قد تحسن نقل الحرارة بالحمل. تتميز قنوات التدفق المزدوجة بمعامل نقل حراري أعلى مقارنة بقناة التدفق المستقيمة الأحادية العادية (النموذج A)، لوحظ أن المعامل h للقنوات المزدوجة يزداد تدريجياً ويظهر الفرق الكبير عند ($q=12000W/m^2$) حيث بلغت الزيادة $2991.4W/m^2.K$ مقارنة بالقناة المستقيمة. تميزت القناة المزدوجة عن الأحادية بمعدل تعزيز حراري يصل إلى 52,9% وهذا راجع لتدفق السائل على جزأين وامتصاص كل جزء للحرارة أي زيادة مساحة التماس بين اللوحة والسائل المتدفق.



الشكل (9.IV): تباين معامل الحمل الحراري (h) بدلالة التدفق الحراري (q) للنموذج المستقيم العادي والنموذج المزدوج للسائل النانوي (خليط W:60/EG:40 - Al_2O_3 : 0.5%) عند ($Re=120$).

2.3.IV. تأثير التصميم المستقيم المزوج على هبوط الضغط

تم قياس هبوط الضغط ΔP للنموذج المزوج (Two stages) ومقارنته بالنموذج المستقيم الأحادي (One stage) للسائل المتدفق ($Al_2O_3:0.5\%$ في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) بين مدخل ومخرج قنوات التدفق. تعرض نتائج المحاكاة في الشكل (10.IV) حيث يمثل تباين هبوط الضغط بدلالة أرقام رينولدز التي تتراوح بين 20 و120. لوحظ زيادة خطية كبيرة جدا في هبوط الضغط للسائل المتدفق داخل القنوات المزوجة، بينما هبوط ضغط متزايد نسبيا عند القنوات الأحادية. لوحظ كلما يزداد عدد رينولدز يزداد الفرق في هبوط الضغط بين النموذجين، حيث بلغت الزيادة في هبوط الضغط $5323.6 Pa$ عند $(Re=120)$ للنموذج المزوج مقارنة بالنموذج (A). يعود هذا الارتفاع العالي في هبوط الضغط بين مدخل ومخرج القنوات (Two stages) لكونها مقسمة إلى جزأين أي تؤدي إلى تأثير تدفق السائل بنقصان مساحة المدخل للقناة مما ينتج عنه فرق ضغط عالي.

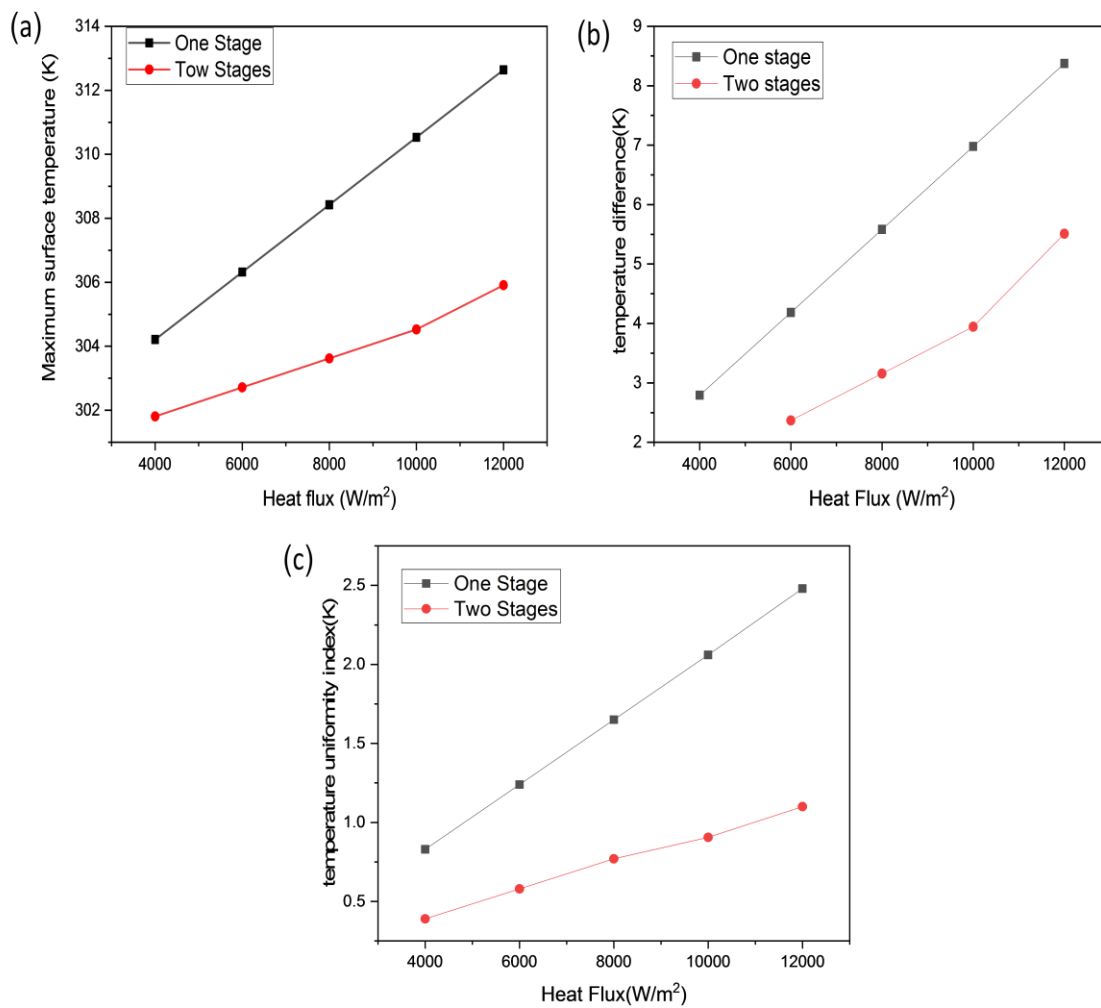


الشكل (10.IV): تغيرات هبوط الضغط (ΔP) بدلالة (Re) للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\%$ - W:60/EG:40) للنموذجين المستقيم الأحادي والمزوج.

3.3.IV. خصائص التوزيع الحراري للتصميم المزوج

في هذا الجزء نقدم خصائص التوزيع الحراري المتمثل في تغيرات درجة الحرارة القصوى T_{max} والفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا ΔT ، ومؤشر تجانس توزيع درجة الحرارة U_T للوحة التبريد للنموذج المستقيم الأحادي والنموذجين المستقيم المزوج المتوازي التيار (co-current) والمتضاد التيار (conter-current).

كما هو موضح في الشكل (11.IV)، تناولت الدراسة تأثير التدفق الحراري q على كل من (T_{max} ، U_T ، ΔT) عند رينولدز 120، حيث تمت مقارنة تأثير التدفق الحراري على انتقال الحرارة وخصائص تدفق السائل النانوي ($Al_2O_3:0.5\%$ في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) للنموذجين (One stage) و(Two stages).

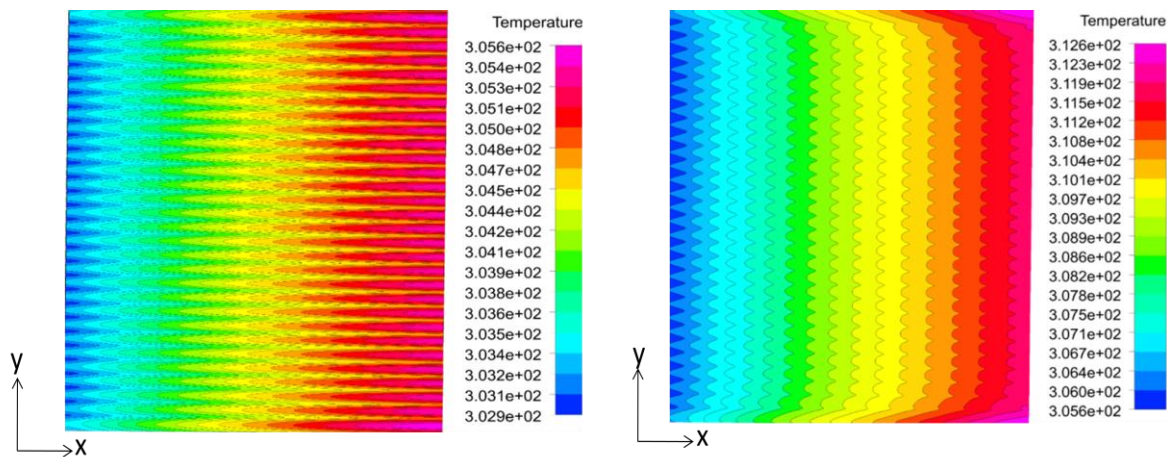


الشكل (11.IV): خصائص النقل الحراري للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنموذجين المستقيم الأحادي والمزدوج بدلالة التدفق الحراري (a): درجة الحرارة القصوى (b) الفرق بين درجة الحرارة القصوى والدنيا، (c) مؤشر تجانس درجة الحرارة.

لوحظ أن درجة الحرارة القصوى للنموذجين تزداد خطياً مع تدفق الحرارة الذي يتراوح من 4000 إلى 12000 W/m^2 ، كذلك الفرق في درجة الحرارة ومؤشر التجانس. تظهر ميزة النقل الحراري الجيدة للنموذج المزدوج عند التدفق الحراري 12000 W/m^2 ، حيث قدرت قيمة درجة الحرارة القصوى 305.9 K بينما في النموذج المستقيم الأحادي بلغت 312.6 K أي تتمتع القنوات المزدوجة بنقل حراري جيد، حيث خفض هذا النموذج درجة الحرارة القصوى بمقدار 6.7 K ، كذلك بلغت نسبة التخفيض في الفرق في درجة الحرارة 2.86 K للنموذج المزدوج مقارنة بالنموذج الأحادي، وهذا ما يبين ميزة التصميم المزدوج بصورة واضحة جداً. أيضاً من الناحية الكمية تتميز القنوات (Two stages) بتجانس كبير في تنظيم توزيع درجة الحرارة عبر ألواح تبريد خلية PEMFC وذلك وضح من نتائج المحاكاة العددية أن U_T القنوات المزدوجة بلغ 0.95 K عند تدفق حراري 12000 W/m^2 بينما بلغ 2.48 K عند القنوات الأحادية.

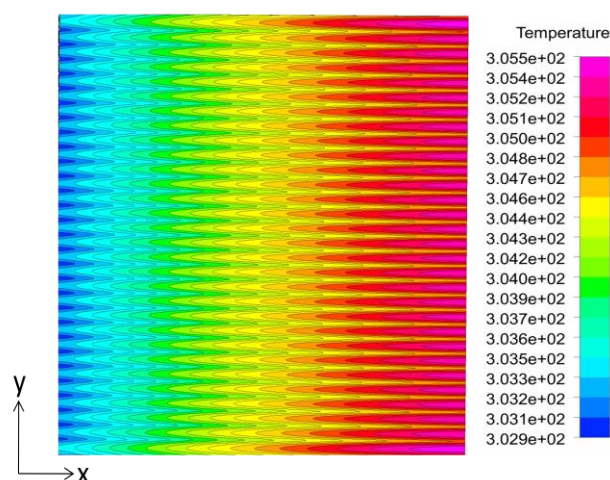
1.3.3.IV. تأثير اتجاه التدفق

يقدم الشكل (12.IV) نتائج المحاكاة العددية لتوزيع درجة الحرارة في منطقة الجدار أسفل اللوحة المعرضة للتدفق الحراري للنموذج المستقيم العادي والنموذج المستقيم المزدوج (Two stages) مع تدفق السائل النانوي (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وايتيلين جلايكول:40) ذات تدفق متوازي (co-current) وتدفق متعاكس (conter-current) عند رينولدز 120. لوحظ تدرج في درجة الحرارة على طول القناة (المحور x)، حيث نلاحظ أن درجة الحرارة تكون أدنى عند المدخل (بسبب امتصاص السائل للحرارة) وأقصى عند مخرج قنوات تدفق سائل التبريد (بسبب تناقص قدرة امتصاص السائل للحرارة). أظهرت النتائج أن فرق النقاط الساخنة المحلية يقدر بنحو 7K، 2.9K، 2.6K للوحة المستقيمة العادية، واللوحة المستقيمة المزدوجة للتيار المشترك، ولوحة التيار المضاد على التوالي. تشير النتائج الواردة هنا إلى أن القنوات (Two stages) تلعب دورا كبيرا في عملية التبريد، حيث تمنع ارتفاع درجة الحرارة الناتجة غالبا من التفاعلات الكهروكيميائية.



اللوحة المستقيمة المزدوجة المتوازية التدفق (النموذج E)

اللوحة المستقيمة الأحادية العادية (النموذج A)

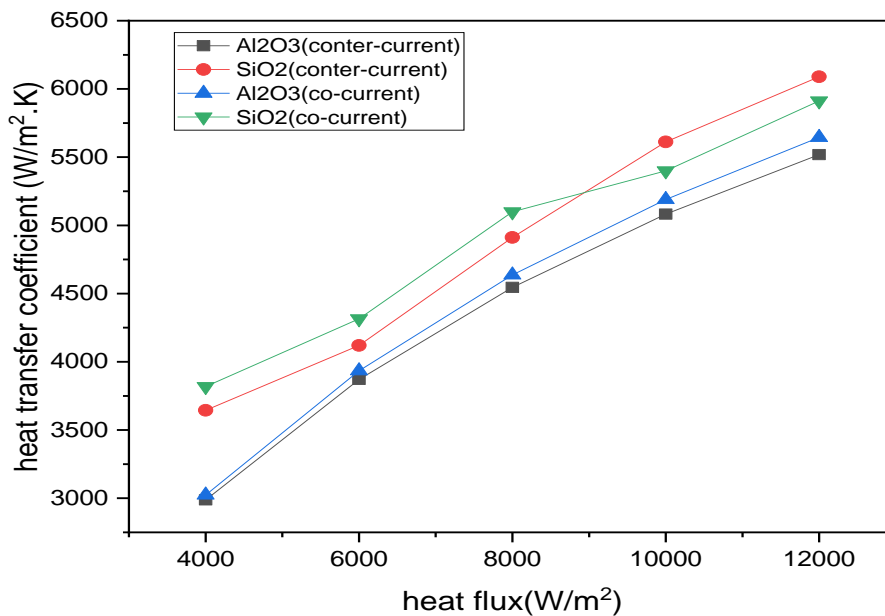


اللوحة المستقيمة المزدوجة المتضادة التدفق (النموذج F)

الشكل (12.IV): توزيع درجة الحرارة في اللوحة من الأسفل للنماذج (A,E,F) للسائل النانوي ($Al_2O_3:0.5\%$ - W:60/EG:40) عند $(Re=120)$.

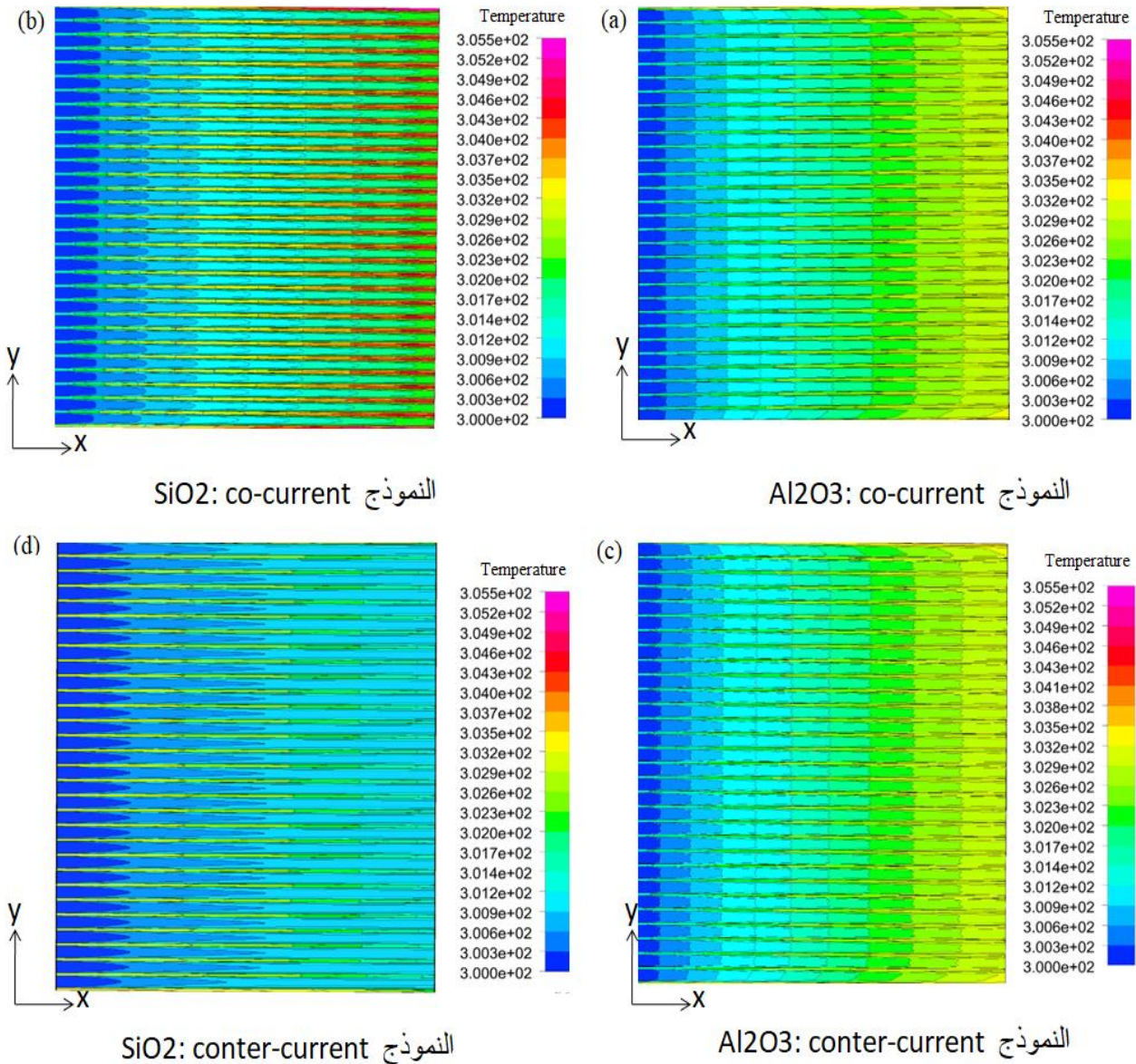
2.3.3.IV. تأثير طبيعة السائل المتدفق

تمت دراسة ومقارنة النقل الحراري بين تدفق نوعين من السوائل النانوية تمثلت في (خليط 0.5% من Al_2O_3 في ماء:60 وايتيلين جلايكول:40) و(0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) ذات تيار متوازي وتيار معاكس، وهذه المقارنة من أجل توضيح أي من السائلين أفضل في نقل الحرارة عند التصميم المزدوج (Two Stages). كما هو مبين في الشكل (13.IV) الذي يعرض نتائج تأثير معامل النقل الحراري h بالتدفق الحراري q وذلك عند رينولدز 120، حيث لوحظ تزايد تدريجي في المعامل h في كل الحالات الأربعة بدلالة الزيادة في التدفق الحراري، كانت النسبة الأكبر في معامل الحمل الحراري عند السائل (0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) في كل من الحالتين التدفق المتوازي والمتعاكس ويظهر الفرق الكبير عند ($q=4000W/m^2$) مقارنة بالسائل (0.5% من Al_2O_3 في ماء:60 وايتيلين جلايكول:40) في كل من حالتي التيار المشترك والمتعاكس.



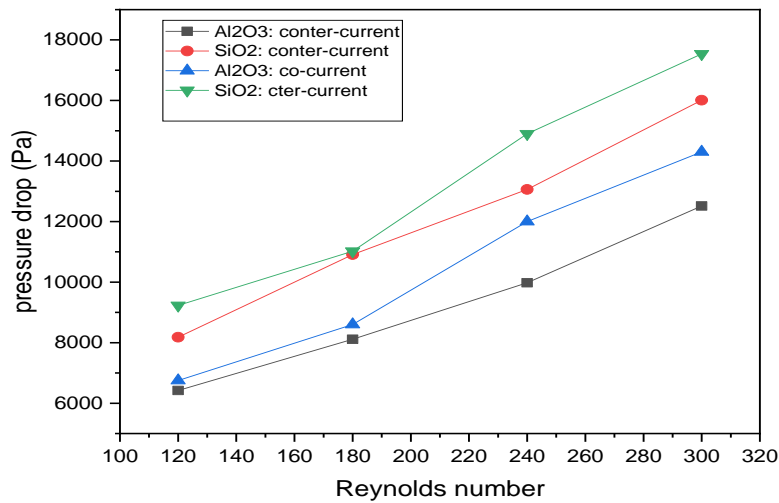
الشكل (13.IV): تأثير التدفق الحراري على معامل الحمل الحراري للتدفق المشترك والمتعاكس للنموذج المزدوج لكل من السائلين ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) عند ($Re=120$).

أيضاً، تم التحقق من تفوق نقل السائل (SiO_2) للحرارة على السائل (Al_2O_3) وذلك بدراسة ومقارنة التوزيع الحراري لكل من السائلين لتيار متوازي وتيار متعاكس في اللوحة (Two Stages) عند رينولدز 120 وتدفق حراري عالي قدره $12000W/m^2$. تعرض نتائج المحاكاة في الشكل (14.IV)، حيث لوحظ ذلك بوضوح في المرحلة (a,c) التي استخدم فيها السائل النانوي (Al_2O_3) بلغت درجة الحرارة القصوى $302.9K$ و $303.1K$ لكل من التيار المشترك والتيار المعاكس على التوالي. بينما في المرحلة (b,d) التي استخدم فيها السائل (SiO_2) قدرت درجة الحرارة $301.7K$ و $301.2K$ للتيار المتوازي والمتعاكس على التوالي. من هنا نستنتج تفوق نقل السائل النانوي أكسيد السيلكون للحرارة بنسبة تقدر بـ $1.4K$ مقارنة بالسائل أكسيد الألمنيوم.



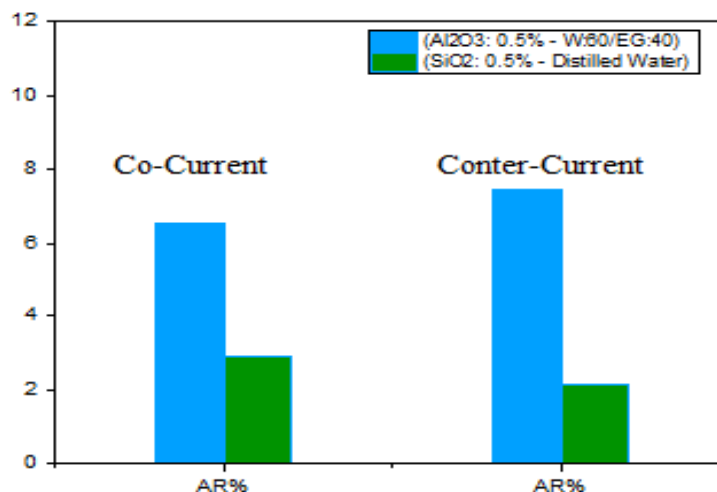
الشكل (14.IV): توزيع درجة حرارة اللوحة جهة السوائل للنموذج المزدوج لحالات التيار المشترك والتيار المتعاكس لكل من السائلين (Al₂O₃:0.5% - W:60/EG:40) و (SiO₂:0.5% - Distilled Water) عند (q=12000W/m² و Re=120).

كذلك تمّت دراسة تأثير التدفق المشترك والمتعاكس للسوائل النانوية المذكورة أعلاه داخل قنوات ألواح التبريد للتصميم المزدوج (Two stage) على الضياع الطاقوي المتمثل في هبوط الضغط. توضح النتائج في الشكل (15.IV)، اعتمدنا على عدد رينولدز يتراوح بين 120 فما فوق وذلك لأنه عند هذه القيم يتم الحصول على النتائج المطلوبة لدراسة مقارنة الضياع الطاقوي بين السائلين. لوحظ أنّ هناك هبوط مرتفع في الضغط بالنسبة للسائل (SiO₂:0.5% - Distilled Water) في كل من الحالتين للتيار المتوازي والمتعاكس مقارنة بالسائل (Al₂O₃:0.5% - W:60/EG:40) بحالتيه، حيث بلغت الزيادة في هبوط الضغط للسائل (SiO₂) في حالة التدفق المتوازي 6000Pa مقارنة بالسائل (Al₂O₃) في حالة التدفق المتعاكس، وهذا ما يقلل من أداء التبريد لسوائل أكسيد السيلكون. يعود هذا الاختلاف في هبوط الضغط بين السائلين إلى الطبيعة الكيميائية للجسيمات النانوية Al₂O₃ و SiO₂ المشتتة في السائل التقليدي المستخدم للتبريد [101].



الشكل (13.IV): تغيرات هبوط الضغط بدلالة (Re) للتدفق المشترك والمتعاكس للنموذج المستقيم المزدوج لكل من السائلين ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) عند $(q=12000W/m^2)$.

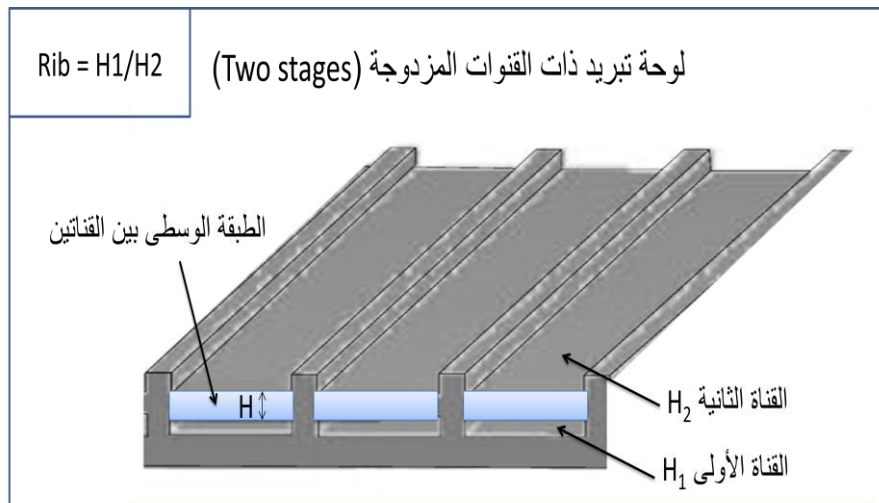
اعتمدنا على نسبة الفائدة (AR) لتقييم الأداء الكلي لتبريد خلية PEMFC لكل من السائلين (خليط 0.5% من Al_2O_3 في ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40) و (0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) المتدفقة في القنوات المستقيمة المزدوجة (Two stages)، حيث أخذت القيم باعتبار رينولدز 120 والتدفق الحراري $12000W/m^2$. تظهر نتيجة الحسابات المعتمدة على المعادلة (3.IV) أنّ نسبة الفائدة عند السائل (Al_2O_3) بقيمة 7.44% و 6.22% عند التدفق المتوازي والمتعاكس على الترتيب، بينما لا تتجاوز فائدة السائل (SiO_2) 3% وهذا يعود إلى ارتفاع الهبوط في الضغط لهذا السائل مما يؤدي إلى خفض أداء التبريد. توضح (AR) في الشكل (16.IV).



الشكل (16.IV): نسبة الفائدة (AR) للسوائل ($Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) و ($SiO_2:0.5\% - Distilled Water$) المتدفقة في القنوات المستقيمة المزدوجة.

4.3.IV. التحسين من جودة هندسة القنوات المزدوجة

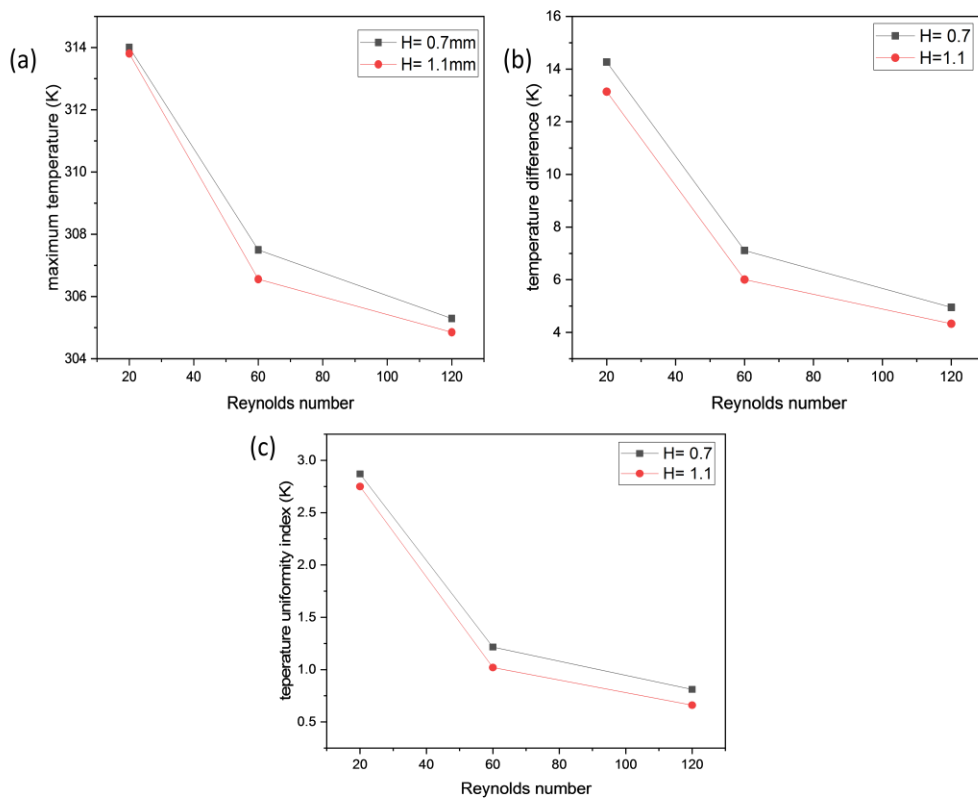
بعد التحقق من تفوق التصميم الهندسي المستقيم المزدوج (Two stages) على التصميم المستقيم الأحادي العادي (One stage) من حيث الأداء الحراري لتبريد خلية PEMFC أجرينا دراسة التحسين من جودة هذا التصميم كما هو ممثل في الشكل (17.IV).



الشكل (17.IV): رسم تخطيطي يوضح لوحة تبريد مزدوجة القنوات.

في المحاكاة الأولى: قمنا بتغيير ارتفاع (H) الطبقة الوسطى الفاصلة بين القنوات، نعلم أن ارتفاع القنوات مع الطبقة الوسطى يبلغ 2.5mm نأخذ قيمتين للارتفاع (H) 1.1mm عندما تكون (H₁=H₂=0.7) و 0.7 عندما (H₁=H₂=0.9). اعتمدنا على التدفق المتوازي للسائل النانوي (خليط 0.5% من AL₂O₃ في ماء:60 وايثيلين جلايكول:40) وتطبيق تدفق حراري يقدر بـ 12000W/m² من أجل التعرف على خصائص النقل الحراري المتمثلة في: درجة الحرارة القصوى T_{max} والفرق في درجة الحرارة القصوى والدنيا (ΔT)، ومؤشر درجة الحرارة U_T.

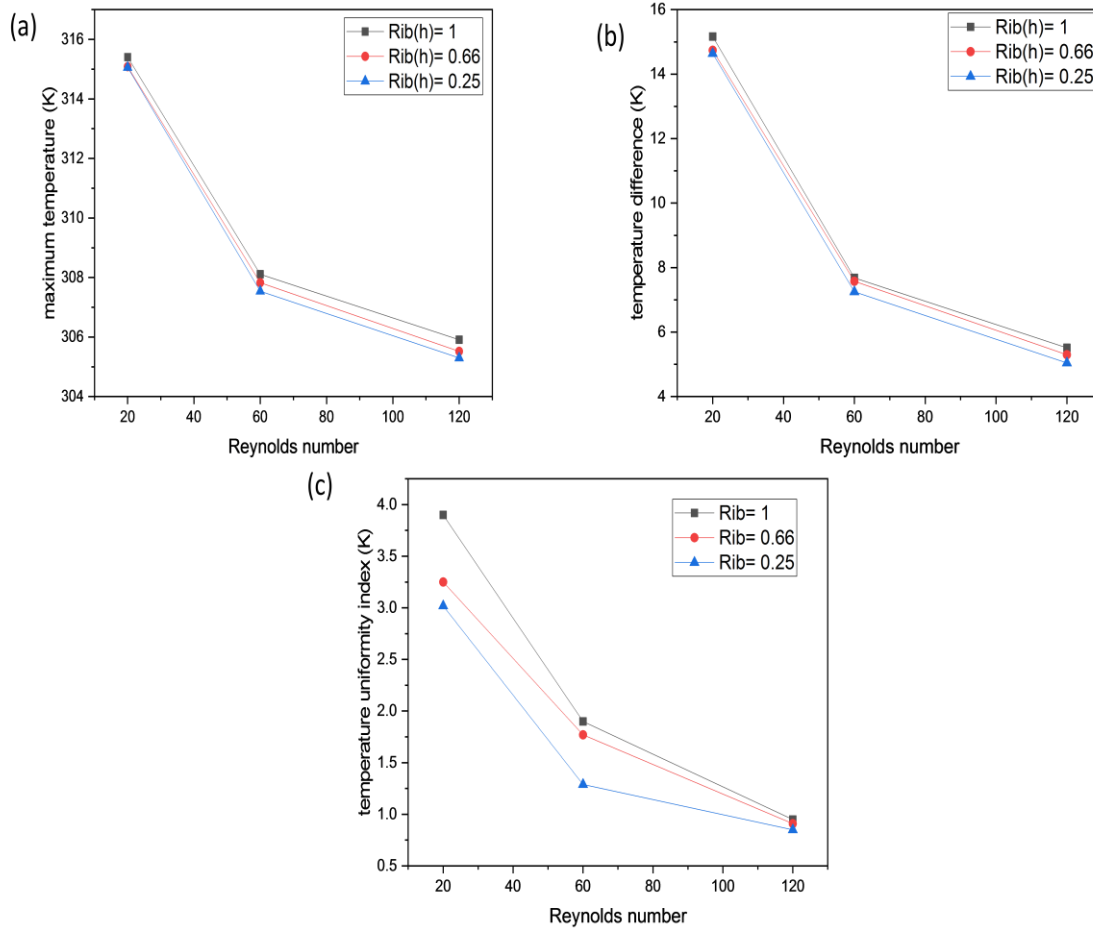
يمثل الشكل (18.IV) تغيرات خصائص النقل الحراري بدلالة رينولدز المدخل للنموذج المستقيم المزدوج المراد تحسين تصميمه الهندسي عند التغيير في ارتفاع الطبقة الوسطى الفاصلة بين القنوات. لوحظ أنه عندما يتم الزيادة في ارتفاع الطبقة الوسطى عن ارتفاع القنوات يزداد الأداء الحراري للوحة التبريد بالرغم من ارتفاع هبوط ضغط السائل المتدفق بسبب تضيق القنوات. عند رينولدز الأكبر من 60 يكون الفرق بين خصائص النقل الحراري واضح جدا، حيث تبلغ درجة الحرارة القصوى 304.8K عند (H=1.1) بينما عند (H=0.7) تكون 305.5K عند (Re=120) أي عندما يكون ارتفاع الطبقة أكبر من ارتفاع القنوات يكون الفرق بين T_{max} للنموذجين 1.1K كذلك مؤشر تجانس توزيع درجة الحرارة يبلغ 0.2K و ΔT تبلغ 0.62K مقارنة بالنموذج التي يكون عنده ارتفاع الطبقة الوسطى صغير. من هنا نستنتج أنه يجب أخذ ارتفاع الطبقة الوسطى أكبر من ارتفاع القنوات وهذا يساهم في تعزيز نقل السائل المتدفق للحرارة أكثر، بينما عندما يكون الارتفاع للطبقة الداخلية صغير يقل امتصاص السائل المتدفق في القناة (H₂) للحرارة.



الشكل (18.IV): تغيرات خصائص النقل الحراري بدلالة (q) للسائل (خليط W:60/EG:40 - $Al_2O_3:0.5\%$) للنموذج المستقيم المزدوج عند التغيير في ارتفاع الطبقة الوسطى بين القناتين.

في المحاكاة الثانية: قمنا بتغيير ارتفاع القناتين (H_1 و H_2) وتحسب النسبة بين الارتفاعين نعبر عنها بـ ($Rib = H_1/H_2$). أيضا في هذه المحاكاة اعتمدنا على التدفق المتوازي للسائل النانوي (خليط 0.5% من Al_2O_3 في ماء:60 وايثيلين جلايكول:40) وتطبيق تدفق حراري قدره $12000W/m^2$. نتائج المحاكاة لتغيرات خصائص النقل الحراري: درجة الحرارة القصوى T_{max} والفرق في درجة الحرارة القصوى والدنيا ΔT ، ومؤشر تجانس درجة الحرارة U_T بدلالة رينولدز توضح في الشكل (19.IV).

عندما تقل النسبة بين ارتفاعي القناتين (Rib) لوحظ أنّ الأداء الحراري يزداد في التحسن أي عندما يكون ارتفاع القناة الأولى المعرضة للتدفق الحراري صغير بمقدار ربع ارتفاع القناة الثانية، وهذا يدل على أنّه عند تدفق السائل في القناتين يعتبر السائل المتدفق في القناة الأولى مساعد لسائل القناة الثانية في امتصاص الحرارة من اللوحة. تظهر النتائج أنّ هناك اختلافات طفيفة جدا لا يمكن الحكم عليها عند رينولدز أكبر من 60 لكل من درجة الحرارة القصوى والفرق بين أقصى وأدنى درجة حرارة ΔT . أما بالنسبة لرينولدز أقل من 60 يشير الشكل (c.19.IV) أنه عندما يكون ($Rib=0.25$) تبلغ قيمة تجانس الحرارة أقل قيمة $0.85K$ أي أكثر تجانسا لدرجة الحرارة في اللوحة يحدث عند هذه الحالة.



الشكل (19.IV): تغيرات خصائص النقل الحراري بدلالة (q) للسائل (خليط $Al_2O_3:0.5\% - W:60/EG:40$) للنموذج المستقيم المزودج عند التغيير في النسبة بين القناتين (Rib).

4.IV. خلاصة

في هذا الفصل، تم إجراء مناقشة نتائج المحاكاة العددية CFD المطبقة في برنامج Ansys Fuent لدراسة تأثير تصميم قنوات ألواح تبريد خلية PEMFC على أدائها الحراري. ومناقشة تأثير السوائل النانوية المتدفقة داخل القنوات ودورها في عملية استخلاص الحرارة. أولاً، تمت دراسة تأثير أربع لوحات تدفق متعرجة ومقارنتها مع اللوحة المستقيمة العادية وفقاً لخصائص التوزيع الحراري وهبوط ضغط السائل النانوي داخل القنوات. أشارت النتائج أنّ شكل المسار الهندسي -S- يتميز بأعلى نقل للحرارة مقارنة مع النموذج المستقيم (One stage). ثانياً، تمت دراسة تأثير القنوات المستقيمة ذات طبقتين على الأداء الحراري وتأثير التدفق المتوازي أو المتعاكس لسائلين مختلفين. أوضحت النتائج أنّ التقسيم العرضي للقنوات المستقيمة يلعب دوراً كبيراً في نقل الحرارة، كما أوضحت التأثيرات الجيدة للسوائل النانوية (0.5% من SiO_2 في الماء المقطر).

خلاصة عامة

خلاصة عامة

إنّ تطوير تكنولوجيا خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) من أجل جعلها قابلة للتطبيق صناعياً يتطلب إدارة حرارية جيّدة لمنع تدهور الأداء الكهربائي للخلية والحفاظ على مركباتها، خاصة الخلايا المطبقة لمركبات النقل. أهم تسيير حراري لهذه الخلايا يتمثل في تبريدها بالسوائل المبردة. بالرغم من الجهود المكثفة للأبحاث حول عمليات التبريد بالسوائل، لا زالت تركز على هندسة قنوات تدفق السائل في ألواح تبريد خاصة تصنع عادة من الغرافيت، وتركز على طبيعة السوائل المبردة من بينها السوائل النانوية التي أصبحت تستخدم بكثرة في تبريد خلايا PEMFC.

في هذا العمل، تمّت دراسة محاكاة عددية لتحليل تأثير التصميم الهندسي لخمس قنوات تدفق مختلفة على الأداء الحراري لخلايا وقود PEMFC. تشمل هذه التصميمات الخمسة قنوات مستقيمة عادية أحادية (One Stage)، وقنوات منكسرة عادية، منكسرة منحنية، قنوات على شكل حرف S-، وكذلك قنوات مستقيمة ذات طبقتين (Two Stages) أي مقسمة عرضياً. تمّ الاعتماد على نموذج ديناميكيات الموائع الحاسوبية (CFD) باستخدام برنامج Ansys Fluent، حيث تضمنت النمذجة ظاهرة نقل الكتلة والحرارة للوحة التبريد. تمّ التحقق من صحة نتائج المحاكاة من خلال أعمال سابقة من الأدبيات الخاصة بهندسة مجال تدفق السوائل المبردة في ألواح تبريد خلية PEMFC، وذلك من خلال معامل نقل الحرارة ومؤشر تجانس درجة الحرارة وهبوط ضغط السائل المتدفق بين مدخل ومخرج القنوات.

نلخص نتائج المحاكاة العددية المتحصل عليها من أجل المقارنة بين القنوات الأحادية (One stage)

في:

- عند مقارنة تأثير التصميم الهندسي على معامل نقل الحرارة (h) للنماذج الأحادية الأربعة باستخدام السائل النانوي (0.5% من Al_2O_3 في خليط ماء:60 وإيثيلين جلايكول:40)، وجد أنّ عند تزايد Re النماذج المتعرجة تتميز بمعامل نقل حراري أعلى، حيث أعلى معدل تعزيز حراري لوحظ عند التصميم S- يقدر بـ 19.3% مقارنة بالنموذج المستقيم.
- أعلى عدد نيوسلت يظهر عند تصميم القناة S- وبمقارنته بالقناة المستقيمة وُجد أنّه ارتفع بنسبة 19.2%، ثم تليها القناة المنكسرة المتموجة بنسبة تعزيز 11.5% تليها القناة المنكسرة العادية بنسبة 2.56%.
- من ناحية الضياع الطاقوي، تمّ الحصول على أعلى هبوط ضغط عند رقم رينولدز 120 قدّر بـ 1537.28 Pa عند القناة المنكسرة المتموجة، تليها القناة S- يحدث فيها هبوط يصل إلى 1464.06 Pa لاحظنا زيادة عالية في هبوط الضغط للقناة S- قدرت بـ 1269.34 Pa مقارنة بالقناة المستقيمة. إنّ الهبوط المرتفع في الضغط لهذه النماذج راجع لتأثير سائل التبريد بالحدود المتعرجة لقنوات التدفق التي تعيق مساره.
- لضمان الاستقرار الحراري لخلية PEMFC من الضروري التحكم في درجة حرارة السطح القصوى T_{max} للوحة التبريد عند مستوى معين. بينت النتائج أنّ T_{max} للقناة S- أقل من القناة المستقيمة بـ 4K تليها القناة المنكسرة المتموجة بنقصان 2.12K ثم المنكسرة العادية بـ 1.28K وهذا ما يدل على تعزيز النقل الحراري للقنوات المتعرجة. كما بينت أنّ القناة S- تتميز بتوزيع درجة حرارة أكثر تجانساً من باقي القنوات.

- تمّ حساب نسبة الفائدة للنماذج المتعرجة لتقيين أدائها الكلي، لوحظ أن قناة التدفق -S- قدرت فائدتها بـ 14.2% مقارنة بالقناة المستقيمة، تليها القناة المتموجة ثم القناة المنكسرة (B). أيضاً، نلخص نتائج المحاكاة العددية المتحصل عليها من أجل المقارنة بين القناة المستقيمة الأحادية (One stage) والقناة المستقيم المزدوجة (Two stage) في:
 - تتميز قنوات التدفق المزدوجة بمعامل نقل حراري أعلى بلغت الزيادة $(2991.4W/m^2.K)$ مقارنة بالقناة المستقيمة، أي بمعدل تعزيز حراري يصل إلى 52,9% وهذا راجع لتدفق السائل على جزأين وامتصاص كل جزء للحرارة بشكل منفصل.
 - لوحظ زيادة خطية كبيرة جداً في هبوط الضغط للسائل المتدفق داخل القنوات المزدوجة، حيث بلغت الزيادة في هبوط الضغط $5323.6Pa$ عند $(Re=120)$ مقارن بالنموذج (A). يعود هذا الارتفاع العالي في هبوط الضغط بين مدخل ومخرج القنوات (Two stages) لكونها مقسمة إلى جزأين أي تؤدي إلى تأثير تدفق السائل بنقصان مساحة المدخل للقناة ممّا ينتج عنه فرق ضغط عالي.
 - خفض النموذج المزدوج درجة الحرارة القصوى عند التدفق الحراري $12000W/m^2$ بمقدار $6.7K$ ، و الفرق في درجة الحرارة بـ $2.86K$ مقارنة بالنموذج الأحادي، كذلك وضح من نتائج المحاكاة العددية أنّ U_T القنوات المزدوجة بلغ $0.95K$ عند تدفق حراري $12000W/m^2$ بينما U_T القنوات الأحادية بلغ $2.48K$ وهذا ما يميز التصميم المزدوج.
 - تمّت دراسة مقارنة السائلين (خليط 0.5% من Al_2O_3 في ماء: 60:40 و 0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) ذات تيار متوازي وتيار متعاكس من حيث النقل الحراري لوحظ النسبة الأكبر في معامل الحمل الحراري عند السائل (0.5% من SiO_2 في الماء المقطر) في كل من الحالتين التدفق المتوازي والمتعاكس.
 - عند الزيادة في ارتفاع الطبقة الوسطى الفاصلة بين القناتين في التصميم المزدوج، لوحظ أنّه يزداد الأداء الحراري للوحة التبريد بالرغم من ارتفاع هبوط ضغط السائل المتدفق بسبب تضيق القناتين.
- أجريت محاكاة عددية (CFD) لدراسة تأثير التصميم الهندسي لقنوات تدفق السائل في ألواح تبريد خلية وقود PEMFC على أدائها الحراري، وذلك لتقليل تكلفة التصنيع. كانت النتائج المتحصل عليها من خلال برنامج Ansys Fluent جيدة، ويمكن أن تقود الأعمال التجريبية في تطبيق هذا العمل خاصة بتصميم النموذج -S- مزدوج التدفق، وذلك لتفوقه في نقل الحرارة بكمية معتبرة مقارنة بالتصميم المستقيم العادي.

المراجع

قائمة المراجع

- [1] C.M. Marchoff, "Transition from non-renewable to renewable energy sources: Fuel cells in Antarctica as an economically attractive niche", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, pp. 303-306, 1998.
- [2] F. Akhtar, M.H. Rehmani, "Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: A review". *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 45, pp. 769-784, 2015.
- [3] S.Z. Qamar, M. Al-Kindi, "Renewability and Sustainability: Current Status and Future Prospects. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*", Elsevier: Oxford, UK, pp. 717-730, 2020.
- [4] M. Bhattacharya, S.R. Paramati, I. Ozturk, S. Bhattacharya, "The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries", *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 733-741, 2016.
- [5] M. Kandidayeni, A. Macias, L. Boulon, F. Trovão, "Online Modeling of a Fuel Cell System for an Energy Management Strategy Design", *J. Energies*, 13(14), 3713, 2020.
- [6] W.E. Mustain, M. Chatenet, M. Page, Y.S. Kim, "Durability challenges of anion exchange membrane fuel cells", *Energy Environ. Sci*, vol. 13, pp. 2805-2838, 2020.
- [7] K. Kordesh, G. Simader, "Fuel cells and their applications", Weinheim. Germany, pp. 2-8, 1996.
- [8] X. Li, "Principles of fuel cells", New York: Taylor & Francis, 2006.
- [9] S. J. C. Cleghorn, X. Ren, T. E. Springer, M. S. Wilson, C. Zawodzinski, T. A. Zawodzinski, S. Gottesfeld, "PEM fuel cells for transportation and stationary power generation applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 12, pp. 1137-1144, 1997.
- [10] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, X. C. Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research", *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 981-1007, 2011.
- [11] H. Chen, X. Zhao, T. Zhang, P. Pei, "The reactant starvation of the proton exchange membrane fuel cells for vehicular applications: A review", *Energy Convers. Manag*, vol. 182, pp. 282-298. 2019.
- [12] A. Faghri, Z. Guo, "Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 3891-3920. 2005.
- [13] Y. Chen, Y. Liu, Y. Xu, X. Guo, Y. Cao, W. Ming, "Modeling and Simulation of Membrane Electrode Material Structure for Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Coating*, 12, 1145, 2022.

- [14] T.Zhang, P.Wang, H. Chen, P. Pei, "A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition", *Appl. Energy*, vol. 223, pp. 249-262, 2018
- [15] L. Sun, J. Shen, Q. Hua, K.Y. Lee, "Data-driven oxygen excess ratio control for proton exchange membrane fuel cell", *Appl. Energy*, vol. 231, pp. 866-875, 2018.
- [16] J. Liu, Y. Gao, X. Su, M. Wack, L. Wu, "Disturbance-Observer-Based Control for Air Management of PEM Fuel Cell Systems via Sliding Mode Techniqu", *IEEE Trans. Control Syst. Technol*, vol. 27, pp. 1129-1138, 2019
- [17] Y. Yuan, Z. Qu, W. Wang, G. Ren, B. Hu, "Illustrative Case Study on the Performance and Optimization of Proton Exchange Membrane Fuel Cell", *ChemEngineering*, 3(1), 23, 2019.
- [18] J. Zhang, Y. Tang, C. Song, J. Zhang, and H. Wang, "PEM Fuel Cell Open Circuit Voltage (OCV) in the temperature range of 23°C to 120°C," *Journal of Power Sources*, vol. 163, pp. 532-537, 2006
- [19] P. Rodatz, F. Buchi, C. Onder, L. Guzzella, " Operational aspects of a large PEFC stack under practical conditions", *J. Power Sources*, vol. 128, pp. 208-217, 2004.
- [20] F. Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier Science, 2005..
- [21] Z. Luo, Z. Chang, Y. Zhang, Z. Liu, J. Li, " Electro-osmotic drag coefficient and proton conductivity in Nafion® membrane for PEMFC", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35 , pp. 3120-3124 ,2010.
- [22] S. M. H. Hashmi, "Cooling strategies for PEMFC stacks", PhD thesis, Helmut Schmidt University, Hamburg (Germany), 2010.
- [23] B. Blunier, A. Miraoui, "Pile à combustible: principes, technologies modélisation et application, Ellipses-Technosup", Paris, 2007.
- [24] S. Curtin, J. Gangi, "2013 Fuel cell technologies market report", washington DC: Breakthrough Technologies Institute, 2014.
- [25] K. Dhathathreyan, N. Rajalakshmi, "Polymer electrolyte membrane fuel cell, in: Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology", Springer, pp. 40-115, 2007.
- [26] A. Ijam, R. Saidur, "Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices)", *Applied Thermal Engineering*, vol. 32, pp. 76-82, 2012.
- [27] K. A. Hamid, W. H. Azmi, M. F. Nabil, R. Mamat, K. V. Sharma, "Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO₂ -SiO₂ nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transf*, vol. 116, pp. 1143-1152, 2018.
- [28] I. Zakaria, Z. Michael, W.A.N.W. Mohamed, A.M.I. Mamat, W.H. Azmi, R. Mamat, R. Saidur, "A review of nanofluid adoption in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells as an alternative coolant", *J. Mech. Eng. Sci*, vol. 8, pp. 1351-1366, 2015.

- [29] W.E. Mustain, M. Chatenet, M. Page, Y.S. Kim, "Durability challenges of anion exchange membrane fuel cells", *Energy Environ. Sci*, vol. 13, pp. 2805-2838, 2020.
- [30] L. Sun, Y. Jin, F. You, "Active disturbance rejection temperature control of open-cathode proton exchange membrane fuel cell". *Appl. Energy*, vol. 261, pp.114-138, 2020.
- [31] C. Y. Wang, "Fundamental models for fuel cell engineering". *Chem. Rev*, vol. 104, pp. 4727-4766, 2004.
- [32] J.D. Ramshaw, "Elements of computational fluid dynamics", World Sci, 2, 140, 2011.
- [33] A. Iranzo, M. Munoz, F. Rosa, J. Pino, "Numerical model for the performance prediction of a PEM fuel cell. Model results and experimental validation", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 533-550, 2010.
- [34] F. Hashemi, S. Rowshanzamir, M. Rezakazemi, "CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields", *Math. Comput. Model.*, vol. 55, pp. 1540-1557, 2012.
- [35] S. Srinivasan, R. Mosdale, P. Stevens, C. Yang, "Fuel cells: reaching the era of clear and efficient power generation in the twenty-first century", *Annual Review Energy Environment*, vol. 24, pp. 281-328, 1999.
- [36] L. E. Snyder, "A feasibility study of internal evaporative cooling for proton exchange membrane fuel cells", Texas A&M University, 2006).
- [37] R. K. Ahluwalia, X. Wang, "Fuel cell systems for transportation: status and trends", *J. Power Sources*, vol. 177, no. 1, pp. 167-176, 2008.
- [38] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice. Academic Press; 2013.
- [39] J. Ramousse, O. Lottin, S. Didierjean, D. Maillet. "Heat sources in proton exchange membrane (PEM) fuel cells", *J. Power Sources*, vol. 192, pp. 435-441, 2009.
- [40] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, Comparative study of different fuel cell technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 981-989, 2012.
- [41] M.A.K. Youcef Shah, P. D. Lund, B. Zhu, "Toward next-generation fuel cell materials", *J. iScience*, vol. 26, iss. 6, 2023.
- [42] Colleen Spiegel, "PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB", Academic Press. Elsevier, 2008.
- [43] Hoberecht and Mark, "NASA PEMFC Development Background and History", NASA Glenn Research Center Cleveland, US, 2011.
- [44] A. B. Stambouli, E. Traversa, "Solid oxide fuel cells (SOFCs): A review of an environmentally clean and efficient source of energy", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 6, no. 5, pp. 433-455, 2002.

- [45] Technical plan-Fuel Cell, "Cost analysis of Fuel Cell systems for transportation Department of Energy", United States, 2008
- [46] Xiao Zhang, "Preparation and Characterization of Proton Exchange Membranes for Direct Methanol Fuel Cells", A Doctoral thesis, Rovira i Virgili (Spain) University, 2005.
- [47] EG&G Services, Fuel Cell Handbook, Parsons, Inc, Morgantown, West Virginiak, 2000.
- [48] Adrien LAMIBRAC, "Study of the degradations induced by start-up/shut-down operations in PEMFC", A Doctoral thesis, Lorraine University, 2013.
- [49] Kerkoub Youcef, "Etude de l'effet des paramètres géométriques et opérationnels sur les phénomènes de transport et sur la Performance d'une pile à combustible PEMFC", A Doctoral thesis, Houari Boumedienne University, 2019.
- [50] Fredy NANDJOU, "Étude locale de la thermique dans les piles à combustible pour application automobile. Corrélation à la durée de vie", A Doctoral thesis, GRENOBLE ALPES University, 2015.
- [51] J. W. Ahn, "Control and Analysis of Air, Water, and Thermal Systems for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", A Doctoral thesis, Auburn University, 2011.
- [52] D. P. Wilkinson , J. Zhang , R. Hui , J. Fergus , X. Li, "Proton Exchange Membrane Fuel Cells", Materials Properties and Performance CRC Press, 2010.
- [53] Rihab Jaralla, "PROTON EXCHANGE MEMBRANE (PEM) FUEL CELL PARAMETRIC STUDY VIA MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL SIMULATION", A Doctoral thesis, Philosophy Ryerson University, Toronto, Canada, 2015.
- [54] H. Li, S. Knights, Z. Shi, W. John, V. Zee, J. Zhang, "Proton Exchange Membrane Fuel Cells", Contamination and Mitigation Strategies, 2010.
- [55] M. Schulze, N. Wagner, T. Kaz, K. A. Friedrich, "Combined electrochemical and surface analysis investigation of degradation processes in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 6, p. 2328-2336, 2007.
- [56] R. M. Darling, "A Hierarchical Model for Oxygen Transport in Agglomerates in the Cathode Catalyst Layer of a Polymer-Electrolyte Fuel Cell", *J. Electrochem Soc*, vol. 165, pp. 71-80, 2018.
- [57] M. Khakaz-Baboli, D. A. Harvey, J. G. Pharoah, "Investigating the performance of catalyst layer micro- structures with different platinum loadings", *ECS Transactions*, vol. 50, pp. 765-72, 2013.
- [58] B. Bladergroen, H. Su, S. Pasupathi, V. Linkov, "Overview of Membrane Electrode Assembly Preparation Methods for Solid Polymer Electrolyte Electrolyzer", *Electrolysis Book*, ch. 3, pp. 45-60, 2012.

- [59] J. Frisk, M. Hicks, R. Atanasoski, W. Boand, A. Schmoeckel, M. Kurkowski, "MEA Component Durability", Fuel Cell Seminar (San Antonio), 2004.
- [60] S. Park, J. W. Lee, B. N. Popov, "A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 37, pp. 5850-5865, 2012.
- [61] G. Inzelt, M. Pineri, J. W. Schultze, M. A. Vorotyntsev, "Electron and proton conducting polymers: recent developments and prospects", Electrochimica Acta, Vol. 45, pp.2403-2421, 2000.
- [62] Francisco Valle, "Electrocatalyst degradation in high temperature PEM fuel cells", A Doctoral thesis, Dagli Studi Di Triest university, 2015.
- [63] X. Li, I. Sabir, "Review of bipolar plates in PEM fuel cells eflow-field designs", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 30, pp. 59-71, 2005.
- [64] D. Spornjak, A. K. Prasad, S. G. Advani, "In situ comparison of water content and dynamics in parallel, single-serpentine, and interdigitated flow fields of polymer electrolyte membrane fuel cells", J. Power Sources, vol. 195, pp. 53-68, 2010.
- [65] Y. Tang, W. Yuan, M. Pan, S. Wan. "Feasibility study of porous copper fiber sintered felt: a novel porous flow field in proton exchange membrane fuel cells", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 35, pp. 9661-9677, 2010.
- [66] P. MAROJU, B.Tech. "MODELING OF A FUEL CELL, A MASTER OF SCIENCE thesis, ELECTRICAL ENGINEERING", Texas Tech University, 2002.
- [67] L. James, A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained". John Wiley and Sons, UK, 2000.
- [68] A. H. C. H. Hammann, W. Vielstich, "Electrochemistry", WileyVCH, 2007.
- [69] Mar'ia Laura Sarmiento Carnevali, "Modelling and Control of PEM Fuel Cells", A Doctoral Thesis, Politecnica Catalunya University, 2017.
- [70] J. Zhang, "PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers", Fundamentals and Applications, Vancouver, Canada, 2008.
- [71] J. Marquis, M. O. Coppens, "Achieving ultra-high platinum utilization via optimization of PEM fuel cell cathode catalyst layer microstructure", Chem. Eng. Sci, vol. 102, pp. 151-162, 2013.
- [72] R. Cownden, M. Nahon, M. A. Rosen, "Modelling and analysis of a solid polymer fuel cell system for transportation applications", Int. J. Hydrog. Energy, vol. 26, pp. 615-623, 2001.
- [73] R. Hahn, S. Wagner, S. Krumbholz, H. Reichl, "Optimization of efficiency and energy density of passive micro fuel cells and galvanic hydrogen generators", MEMS/MOEMS, pp. 34-41, 2008
- [74] H. Tamura, M. Matsumoto, "Fuel Cell Vehicles: Technology Development Status and Popularization Issues", Int. Congr Converg.. Expo. Transp. Electron, pp. 1-8, 2002.

- [75] G. Zhang, S.G. Kandlikar, "A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 2412-2429, 2012.
- [76] F. S. Nanadegani, E. N. Lay, B. Sunden, "Effects of an MPL on water and thermal management in a PEMFC". *Int. J. Energy Res*, vol. 43, pp. 274-296, 2018.
- [77] M. Imazeki, T. Ushio, "Cooling system for fuel cell," ed. Google Patents, 2004.
- [78] C. Song, Y. Tang, J. L. Zhang, J. Zhang, H. Wang, J. Shen, S. McDermid, J. Li, P. Kozak, "PEM fuel cell reaction kinetics in the temperature range of 23-120°C" *Electrochimica Acta*, vol. 52, pp. 2552-2561, 2007.
- [79] P. Bujlo, C. Cornelius, O. Barron, N. Dyantyi, V. Linkov, S. Pasupathi, "Development, manufacture and validation of an open cathode LT-PEMFC stack at HySA systems", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 29478-29487, 2021.
- [80] A. D. Heras, F. J. Vivas, F. Segura, M. J. Redondo, J. M. Andújar, "Air-cooled fuel cells: Keys to design and build the oxidant/cooling system". *Renew. Energy*, vol. 125, pp. 1-20, 2018.
- [81] A. Dicks, D. Rand, "Fuel Cell Systems Explained", 3rd ed. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, USA, 2018.
- [82] A. Fly, R. H. Thring, "A comparison of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy*", vol. 41, pp. 14217-14227, 2016.
- [83] C. Y. Wen, G. W. Huang, "Application of a thermally conductive pyrolytic graphite sheet to thermal management of a PEM fuel cell", *J. Power Sources*, vol. 178, pp. 132-140, 2008.
- [84] S. M. Baek, S. H. Yu, J. H. Nam, C. J. Kim, "A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different flow field designs", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 1427-1434, 2011.
- [85] M. H.S. Bargal, M. A.A. Abdelkareem, Q. Tao, J. Li, J. Shi, Y. Wang. "Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey", *Int. J. Alexandria Engineering*, vol. 59, pp. 635-655, 2020.
- [86] X. Zhao, Y. Li, Z. Liu, Q. Li, W. Chen, "Thermal management system modeling of a water cooled proton exchange membrane fuel cell", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 3048-3056, 2015.
- [87] A. P. Sasmito, E. Birgersson, A. S. Mujumdar, "Numerical investigation of liquid water cooling for a proton exchange membrane fuel cell stack", *J. Heat Transfer Engineering*, vol. 32, pp.151-167, 2011.
- [88] F. C. Chen, Z. Gao, R. O. Loutfy, M. Hecht, "Analysis of optimal heat transfer in a PEM fuel cell cooling plate", *J. Fuel Cells*, vol. 3, pp. 181-188, 2003.
- [89] E. Afshari, M. Ziaei-Rad, M. M. Dehkordi, "Numerical Investigation on a Novel Zigzag-Shaped Flow Channel Design for Cooling Plates of PEM Fuel Cells",

- J. Energy Inst, vol. 90, pp. 752-763, 2017.
- [90] J. Choi, Y. H. Kim, Y. Lee, K. J. Lee, Y. Kim, "Numerical analysis on the performance of cooling plates in a PEFC", J. Mechanical Science and Technology, vol. 22, pp. 1417-1425, 2008.
- [91] S. H. Yu, S. Sohna, J. H. Nam, C. J. Kim, "Numerical study to examine the performance of multi-pass serpentine flow-fields for cooling plates in polymer electrolyte membrane fuel cells", J. Power Sources, vol. 194, pp. 697-703, 2009.
- [92] A. P. Sasmito, J. C. Kurnia, A. S. Mujumdar, "Numerical evaluation of various gas and coolant channel designs for high performance liquid-cooled proton exchange membrane fuel cell stacks", J. Energy, vol. 44, pp. 278-291, 2012.
- [93] S. Ravishankar, K. A. Prakash, "Numerical studies on thermal performance of novel cooling plate designs in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks", J. Applied Thermal Engineering, Vol. 66, pp. 239-251, 2014.
- [94] E. Afshari, M. Ziaei-Rad, Z. Shariati, "A study on using metal foam as coolant fluid distributor in the polymer electrolyte membrane fuel cell", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 41, pp. 1902-1912, 2016.
- [95] S. M. Rahgoshay, A. A. Ranjbar, A. Ramiar, E. Alizadeh, "Thermal investigation of a PEM fuel cell with cooling flow field", J. Energy, vol. 134, pp. 61-73, 2017.
- [96] M. Ghasemi, A. Ramiar, A. A. Ranjbar, S. M. Rahgoshay, "A numerical study on thermal analysis and cooling flow fields effect on PEMFC performance", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 42, pp. 24319-24337, 2017.
- [97] S. Li, B. Sundén, "Numerical study on thermal performance of non-uniform flow channel designs for cooling plates of PEM fuel cells", Int. J. Computation and Methodology, vol.73, pp. 917-930, 2018.
- [98] S. Li, B. Sundén, "Numerical analysis on thermal performance of cooling plates with wavy channels in PEM fuel cells, Int. J. Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, vol. 28, pp.1684-1697, 2018.
- [99] L. Lin, J. Zhao, G. Lu, X. D. Wang, W. M. Yan, "Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude", Int. J. Thermal Sciences, vol. 118, pp. 423-434, 2017.
- [100] J. Song, Y. Huang, Y. Liu, Z. Ma, L. Chen, T. Li, X. Zhang, "Numerical Investigation and Optimization of Cooling Flow Field Design for Proton Exchange Membrane Fuel Cell", J. Energies, 15(7), 2609, 2022.
- [101] M. S. Idris, I. A. Zakaria, W. A. W. Hamzah, "Heat Transfer and Pressure Drop of Water Based Hybrid $Al_2O_3:SiO_2$ Nanofluids in Cooling Plate of PEMFC", J. Advanced Research in Numerical Heat Transfer, vol. 4, pp. 1-13, 2021.
- [102] M.R. Islam, B. Shabani, G. Rosengarten, J. Andrews, "The potential of using nano-fluids in PEM fuel cell cooling systems: a review", Renew. Sustain. Energy Rev, vol. 48, pp. 523-539, 2015.

- [103] M. R. Islam, B. Shabani, G. Rosengarten, "Nanofluids to improve the performance of PEM fuel cell cooling systems: a theoretical approach", *Appl Energy*, vol. 178, pp. 660-671, 2016.
- [104] S. F. A. Talib, W. H. Azmi, I. Zakaria, W. A. N. W. Mohamed, A.M.I. Mamat, H. Ismail, W.R.W. Daud, "Thermophysical Properties of Silicon Dioxide (SiO₂) in Ethylene Glycol/Water Mixture for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cooling Application", *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 366-371, 2015.
- [105] I. Zakaria, W. H. Azmi, W. A. N. W. Mohamed, R. Mamat, G. Najafi, "Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of Al₂O₃ nanofluid in water-ethylene glycol mixture for proton exchange membrane fuel cell application", *Int. Commun. Heat Mass Transf*, vol. 61, pp. 61-68, 2015.
- [106] R. Islam, B. Shabani, J. Andrews, G. Rosengarten, "Experimental investigation of using ZnO nanofluids as coolants in a PEM fuel cell", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 19272-19286, 2017.
- [107] R. Islam, B. Shabani, "Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells", *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 550-557, 2019.
- [108] I. Zakaria, W. A. N. W. Mohamed, M. B. Zailan, W. H. Azmi, "Experimental analysis of SiO₂-Distilled water nanofluids in a Polymer Electrolyte Membrane fuel cell parallel channel cooling plate", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 25850-25862, 2019.
- [109] M. Saeedan, M. Ziaei-Rad, E. Afshari, "Numerical thermal analysis of nanofluid flow through the cooling channels of a polymer electrolyte membrane fuel cell filled with metal foam", *Int. J. Energy Res*, pp. 1-19, 2020.
- [110] A. El-kharouf, A. Chandan, M. Hattenberger, B. G. Pollet, "Proton exchange membrane fuel cell degradation and testing: review", *J. Energy Institute*, vol. 85, pp. 188-200, 2012.
- [111] I. Zakaria, W. Azmi, A. Mamat, R. Mamat, R. Saidur, S. A. Talib, "Thermal analysis of Al₂O₃-water ethylene glycol mixture nanofluid for single PEM fuel cell cooling plate: an experimental study", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 96-112, 2016.
- [112] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, John Wiley & Sons, 2004.

Abstract

Due to the energy crisis and the rising level of pollution around the world, a great interest was recorded about the fuel cell, as it has no production other than water and heat. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is an electrochemical device that are designed to directly convert, with high efficiency, the chemical energy from the reaction of a hydrogen and an oxygen into electricity. A major challenge for improving the characteristics of fuel cells is to obtain uniform temperature distribution during its operation, in which a major part of hydrogen chemical energy is converted to heat. If not properly exhausted, this exothermic chemical reaction causes overheating in the polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs), leading to a reduction in their performance. Hence, analyzing different techniques for PEMFCs cooling may be necessary for this kind of energy systems. In this thesis, some previous studies on fuel cells and the most important technologies used in cooling them were presented. Mathematical modeling of fluid and heat transfer was also addressed. In the results section, the effectiveness of five different cooling plate designs ($150 \times 181 \text{ mm}^2$) in terms of heat transfer behavior was studied using Computational Fluid Dynamics (CFD). The performance of the proposed designs was evaluated in terms of maximum temperature and uniformity of thermal distribution, as well as in terms of energy loss. The suggested study has been validated by available published results from previous research studies. The obtained results depicted that the maximum temperatures have been 305.3K and 301.5K for -S- character flow field and two stages coolant flow field microchannel designs, respectively. The results revealed that the two-flow plate designs might greatly enhance the performance of PEMFCs in terms of temperature distribution in the cooling plate when compared to standard flow field designs.

Keywords: PEMFCs; CFD; Nanofluid; Cooling Plate; Microchannel; Heat Transfer.

الملخص

بسبب أزمة الطاقة وارتفاع مستوى التلوث حول العالم، سجل اهتمام كبير بخلية الوقود، إذ لا ينتج منها سوى الماء والحرارة. خلية وقود غشاء تبادل البروتون (PEMFC) عبارة عن جهاز كهروكيميائي مصمم لتحويل الطاقة الكيميائية مباشرة بكفاءة عالية من تفاعل الهيدروجين و الأكسجين إلى كهرباء. يتمثل التحدي الرئيسي لتحسين خصائص خلايا الوقود في الحصول على توزيع موحد لدرجة الحرارة أثناء تشغيلها، حيث يتم تحويل جزء كبير من الطاقة الكيميائية الهيدروجينية إلى حرارة. إذا لم يتم استنفاد حرارة هذا التفاعل الكيميائي بشكل صحيح، فإنه يسبب في ارتفاع درجة حرارة الخلية، مما يؤدي إلى انخفاض أدائها. وبالتالي، قد يكون تحليل التقنيات المختلفة لتبريدها ضروريًا. في هذه الأطروحة، تم عرض بعض الدراسات السابقة الخاصة بخلايا الوقود و أهم التقنيات المستعملة في تبريدها. تم التطرق أيضا إلى النمذجة الرياضية لانتقال المائع و الحرارة. في الجزء الخاص بالنتائج، تمت دراسة نجاح خمسة تصاميم مختلفة لألواح التبريد ($150 \times 181 \text{ mm}^2$) من ناحية سلوك انتقال الحرارة باستخدام ديناميكا الموائع الحسابية (CFD). تم تقييم أداء التصاميم المقترحة من حيث درجة الحرارة القصوى والتجانس في التوزيع الحراري و كذلك من ناحية الضياع الطاقي. تم التحقق من صحة النموذج الرياضي المقترح من خلال النتائج المنشورة المتاحة في الدراسات البحثية السابقة. أوضحت النتائج التي تم الحصول عليها أنّ درجات الحرارة القصوى كانت 305.3K و 301.5K لمجال التدفق -S- وتصميم القنوات المزدوجة على التوالي. كشفت النتائج أن تصاميم الألواح مزدوجة التدفق قد تعزز أداء مركبات PEMFCs بشكل كبير من حيث توزيع درجة الحرارة في لوحة التبريد عند مقارنتها بتصميمات مجال التدفق الأحادي.

الكلمات الرئيسية: ديناميكا الموائع الحسابية (CFD)؛ PEMFCs؛ السائل النانوي؛ لوحة التبريد؛ قناة متناهية الصغر؛ نقل الحرارة.