IRAQI Academic Scientific Journals
العراقية المجلات الأكاديمية العلمية
مجلة جامعة الكوت
ISSN (E): 2616 - 7808 II ISSN (P): 2414 - 7419
www.kutcollegejournal.alkutcollege.edu.iq
k.u.c.j.sci@alkutcollege.edu.iq
المجلد 10 ، العدد 1 ، حزيران 2025

المواد المركبة واستخدامها في صناعة النفط والغاز

عقيل عبد الحسين غانم [1]

المستخلص

يهدف البحث الى التعريف بالمواد المركبة وتطور استخدامها في المجالات الصناعية المختلفة والأشارة الى اهم انواعها المستخدمة في مجال الصناعات النفطية وتصنيفها .

ويستعرض هذا البحث مميزات المواد المركبة و وخواصها التي أدت الى تفوقها على المواد الهندسية الاخرى في بعض الجوانب والتي يمكن استثمارها في الصناعات النفطية .

فضلا عن ذلك يوضح البحث بعض طرق تصنيع المواد المركبة لصناعة الاجزاء والمقاطع في الصناعات النفطية مثل الأوعية والأنابيب أو في معالجة النضوحات مع تقديم امثلة على استخداماتها والفوائد المترتبة على هذا الاستخدام والتي توضح الجدوى الاقتصادية لأستخدام المواد المركبة في مجال الصناعات النفطية وخصوصا صناعة الانابيب والاوعية وكذلك استخدامها في معالجة الانابيب المعدنية التي يصعب اصلاحها بالطرق التقليدية .

كما يستعرض البحث تطور استخدام المواد المركبة في صناعة الانابيب إذ تُصنَع انابيب البلاستك المقواة بالمواد المركبة وتسمى الأنابيب البلاستيكية الحرارية المقواة Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) التي تستخدم للانشاء السريع لخطوط انابيب النفط والغاز إذ تُنقَل على شكل بكرات مما يسهل عملية نقلها فضلا عن مقاومتها للضغوط العالية والمواد المسببة للتأكل وخفة الوزن.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، الانابيب، الاوعية، النفط والغاز

انتساب الباحث
[1] الدائرة الفنية، وزارة النفط، العراق، بغداد، 10001

[1] aqeelganem@gmail.com

[1] **المؤلف المراسل**

معلومات البحث
تأريخ النشر: حزيران 2025

Composite Materials and their Use in the Oil and Gas Industry

Aqeel Abdulhussein Ganem [1]

Abstract

The research aims to define composite materials and the development of their use in various industrial fields, and to refer to the most important types used in the field of oil industries and their classification. During this research, the advantages and properties of composite materials will be reviewed, which led to their superiority over other engineering materials in some aspects, which can be invested in the oil industries.

In addition, some methods of manufacturing composite materials for the manufacture of parts and sections in the oil industries such as vessels and pipes or in the treatment of exudates will be clarified with examples of their uses and the benefits arising from this use, which illustrate the economic feasibility of using composite materials in the field of oil industries, especially the manufacture of pipes and vessels as well It is used in the treatment of metal pipes that are difficult to repair by traditional methods. The development of the use of composite materials in the pipe industry will also be reviewed, where plastic pipes reinforced with composite materials have been manufactured, called Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP), which are used for the rapid construction of oil and gas pipelines, which are characterized by corrosion resistance and light weight.

Keywords: Composite Materials, Pipes, Vessels, Oil and Gas

Affiliation of Author
[1] Technical Directorate, Ministry of Oil, Iraq, Baghdad, 10001

[1] aqeelganem@gmail.com

[1] **Corresponding Author**

Paper Info.
Published: Jun. 2025

المقدمة

كما هو معلوم فإن استخدام المواد المركبة (Composite Materials) في تزايد مستمر في مختلف مجالات الحياة وبشكل خاص في مجال الصناعات النفطية إذ تستخدم في صناعة الأنابيب والأوعية فضلا عن استخدامها في صناعة الاجزاء الثانوية من هياكل المنشئات النفطية مثل السلالم والارضيات والممرات لما لها من مقاومة للمواد المسببة للتآكل مثل كبريتيد الهيدروجين (H2S) والمواد الاخرى مثل حامض الهيدروكلوريك (HCL) والصودا الكاوية (NaOH) .

ففي مجال الانابيب تعدّ أنابيب الإيبوكسي المقواة بالألياف الزجاجية (أنابيب الفايبركلاس) احد ابرز الامثلة عن استخدام المواد المركبة في الصناعات النفطية إذ تستخدم هذه الأنابيب مع القطع والوصلات الخاصة بها للاستخدام فوق الأرض أو تحتها ، وتستخدم هذه الأنابيب في نقل المنتجات النفطية وفي شبكات الاطفاء وشبكات ماء التبريد وشبكة ماء الشرب وشبكات التصريف وفي نقل النفط الخام وكذلك نقل الغاز تحت ضغط عالٍ ودرجة حرارة تصل حتى 180 درجة مئوية

يسهم استبدال انابيب الحديد الكاربوني بالانابيب المصنوعة من المواد المركبة في انخفاض الكلفة المترتبة على استبدال هذه الانابيب فضلا عن توفير الجهد المبذول في تصنيع واعادة تركيب هذه الانابيب إذ تتميز أنابيب المواد المركبة بخفة الوزن . والقابلية على الاصلاح والصيانة في حال تعرضها للأضرار

كما تستخدم المواد المركبة في معالجة وقطع النضوحات في الأنابيب والأوعية في المقاطع الصعبة الاستبدال او التصليح بالطرق التقليدية او في حالة عدم امكانية ايقاف وعزل الأنبوب . هذا بالأضافة الى استخدام الايبوكسي في طلاء الأنابيب للمحافظة عليها من التأكل. [2,1]

مشكلة البحث

يعد التآكل احد اكبر المشاكل التي تواجه الصناعة بشكل عام والصناعة النفطية بشكل خاص لما تسببه من هدر في المواد والمنتجات بسبب النضوحات والتسربات فضلاً عن المخاطر والحرائق الناتجة عن هذه النضوحات وما يرافقها من توقفات للعمليات الانتاجية والخسائر المادية والتعاقدية المترتبة على توقف التجهيز بالمنتجات . كما ان سرعة مد وصيانة الأنابيب تعد من المشاكل والمعوقات في مشاريع الشركات النفطية .

أهمية البحث

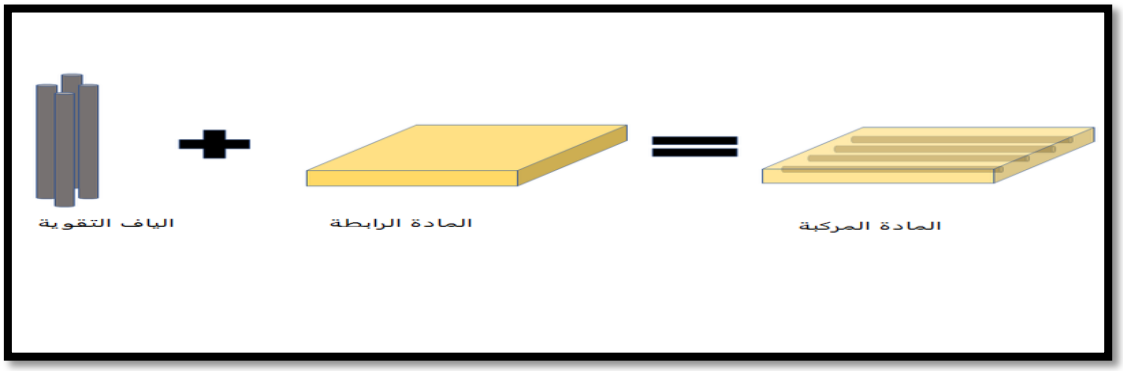
توضيح الفوائد المترتبة على استخدام المواد المركبة في الصناعة النفطية التي تساعد على وضع الحلول المناسبة لمشكلة التأكل من خلال استبدال بعض الانابيب والأوعية والتي تكون اكثر عرضة للتآكل من غيرها إذ وجد ان استخدام الانابيب المصنوعة من المواد المركبة التي تمتاز بمقاومة للمواد المسببة للتآكل في مجال الصناعات النفطية مثل كبريتيد الهيدروجين (H2S) والمواد الاخرى مثل حامض الهيدروكلوريك HCL والصودا الكاوية NaOH فضلاً عن توفير الوقت في سرعة مد الانابيب وصيانتها بشكل اسرع عند تعرضها للاضرار .

إجراءات البحث

ضمن اجراءات البحث سنعرّف بالمواد المركبة واستخداماتها الصناعية المختلفة واستعراض اهم انواعها المستخدمة وكذلك طرق تصنيعها وصولاً الى توضيح استخداماتها المختلفة في الصناعة النفطية والفوائد المترتبة على استخدامها والتوصية بأستخدامها بعد دراسة الجدوى الاقتصادية والحاجة لها من قبل الشركات النفطية.

1 . المواد المركبة (Composite Materials)

يمكن تعريف المواد المركبة بأنها المواد التي تتكون من خليط من مادتين مختلفتين متمايزتين أو أكثر أولاهما مادة تقوية والثانية هي المادة الرابطة . مادة التقوية تكون على شكل حبيبات او ألياف طويلة او قصيرة مصنوعة من مواد طبيعية او صناعية عالية المقاومة والمادة الثانية هي المادة الرابطة كأن تكون معدنًا أو بوليمر او سيراميك مثلا وهي التي تعطي المنتج النهائي شكله المطلوب ، علمًا أنه لا يوجد تفاعل كيميائي او ذوبان في هذا الخليط ، وكل مادة تحتفظ بخواصها الأساسية وتكون الخواص الميكانيكية للمنتج النهائي مغايرة لخواص أي من المواد المؤلفة كما موضح في الشكل (1) [2,1]



الشكل (1) المادة المركبة [3]

تعتمد المواد المركبة على مبدأ التقوية الذي يتمثل بتقوية المادة الرابطة بأستخدام الألياف او الحبيبات (مادة التقوية) والتي تمثل الهيكل الذي يتحمل القوى الميكانيكية وتمتاز هذه المادة بالقوة والمتانة لكن هنالك مشكلة الهشاشة والتي يمكن معالجتها باستخدام المادة الرابطة . بالاضافة الى ذلك تلعب المادة الرابطة دوراً مهماً في المواد المركبة ويمكن تلخيص دورها في المواد المركبة المتكونة من المادة الرابطة والألياف بالآتي :

1. ايصال الحمل الميكانيكي ونقله الى ألياف التقوية. ولنقل الإجهادات الى الألياف بشكل افضل ، تحتاج المواد المركبة إلى مساحة أعلى للسطح البيني (Interface) بين المادة الرابطة والألياف ومن ثمّ زيادة الترابط بينهما. وهذه المساحة الأعلى يتم تحقيقها ضمن حجم او كمية ثابت للألياف ضمن المادة المركبة وذلك عبر تصغير قطر الألياف، إذ أن مساحة السطح البيني متناسبة بشكل عكسي مع قطر الألياف في حال تثبيت الحجم المستخدم منها.
2. الفصل بين ألياف التقوية ومن ثمّ عزل التشققات التي تحدث في هذه الألياف ومنع انتشارها والسبب في ذلك كثرة السطوح البينية بين الألياف والمادة الرابطة مما يوفر مقاومة لأنتشار التشققات إذ تحتاج هذه التشققات الى طاقة اكبر لاختراق السطوح البينية.
3. حماية ألياف التقوية من العوامل الخارجية. [2,1]

2. تطور أستخدام المواد المركبة (Evolution of the use of composite materials)

أزداد الاهتمام بالمواد المركبة في الستينات من القرن الماضي كمادة هندسية وذلك لخواصها الفريدة وقد تجسد هذا الاهتمام بشكل بارز في مجالات الصناعة التي تتطلب :

1. خفة الوزن.
2. مقاومة عالية و قوة تحمل كبيرة.

وقد أثبتت هذه المواد نجاحاً في الاستخدامات (الفضائية ، والنقل ، والصناعة المدنية والعسكرية ، والصناعات الزراعية ، والصناعات الطبية ...الخ) رغم أنها ولدت أصلا في عالم صناعة الطائرات ومركبات الفضاء والصناعات البحرية الحديثة ، إذ تلعب خفة الوزن دوراً رئيساً في اختيار المواد. الشكل (2) يوضح استخدامات المواد المركبة في المجالات المختلفة [2]

الشكل (2) استخدامات المواد المركبة [4]

تُصنَّف المواد المركبة حسب نوع مادة تقوية ونوع المادة الرابطة المستخدمة في المواد المركبة .

يعد الخشب مادة مركبة طبيعية تتألف من مادة (الخشبين) مقوى بألياف السيليلوز كما استخدمت المواد المركبة قديما إذ استعمل السومريون والمصريون القدماء المواد المركبة في البناء عن طريق خلط الطين بالتبن . كذلك يعدّ الكونكريت من المواد المركبة المكونة من حبيبات رمل مع أسمنت ويمكن اضافة قضبان الحديد كما في الخرسانة المسلحة.

في بداية تطور أستخدام المواد المركبة استخدمت نشارة الخشب او بقايا صناديق التعبئة الخشبية او الاثاث الخشبي، وذلك بعد تقطيعها وخلطها مع بعض انواع البوليمرات مثل البولي بروبيلين وتكون نسبة الخشب فيها بين ثلاثين وسبعين في المئة. وهذه المنتجات

يمكن استخدامها في صناعة الأثاث وفي اطارات الأبوب والنوافذ وبعض اجزاء بدن السيارت إذ لا تتعرض كل هذه المنتجات إلى إجهادات عالية أثناء الاستخدام . وقد استخدمت الألياف الطبيعية المجوفة وذات المسامات مثل ألياف الخيزران في تطبيقات معينة وذلك لخواصها في عزل الحرارة والصوت إذ تستخدم هذه الألياف بعد خلطها ببعض اللدائن لصناعة الواح التغليف الداخلي في السيارات للأبواب والسقوف وكذلك الألواح الفاصلة بين المحرك ومقصورة الركاب، ولوحة أجهزة القياس ، كما تمتاز هذه الألواح بمقاومتها للخدش علما انها لا تتطلب عمليات تشطيب نهائي لأن منظرها جميل وتتوفر بألوان مختلفة. [2]

هناك الكثير من المواد المركبة والتي تستخدم فيها خلائط من المعادن او الخزف (السيراميك) إذ تستخدم في العديد من التطبيقات فمثلا تستخدم المواد المركبة ذات المادة الرابطة الخزفية للتطبيقات المتقدمة في الجوفضاء وفي المجال العسكري والنووي. تتكون المواد المركبة ذات الأساس المعدني من مادة رابطة معدنية (ألمنيوم، ونيكل، ومغنيسيوم، أو زنك) وتكون مادة التقوية معدنية أو خزفية .

تعد البوليمرات المقواة بالألياف الطويلة من اكثر انواع المواد المركبة استخداماً إذ تتكون من ألياف طويلة (كألياف الكربون وألياف الزجاج وألياف الكفلار مثلا) مع احد انواع البوليمرات حسب نوع الاستخدام المطلوب . وتستخدم هذه المواد في الكثير من التطبيقات ففي صناعة الطائرات ينخفض وزن الطائرة بنسبة تفوق 20 % عند استخدام المواد المركبة ، كما تستخدم في مجال الفضاء وذلك لخاصية الإستقرار في الأبعاد ضمن مجال حراري واسع يتقلب بين 160 درجة مئوية تحت الصفر و93 درجة فوق الصفر . كما استخدمت هذه المركبات في صناعة المروحة الامامية في محرك (turbofan) وكذلك غطاء الرادار في الطائرات إذ تستخدم ألياف الزجاج لهذا الغرض وذلك كونها ذات نفاذية عالية بالنسبة للموجات الراديوية كما موضح في الشكل (3)، كما استخدمت في صناعة زوارق الأنقاذ والاجهزة الرياضية والطبية والمعدات الزراعية وغيرها الكثير من التطبقات إذ تتميز البوليمرات المقوات بألياف التقوية بالقوة العالية والوزن الخفيف وسيتم التركيز على هذا النوع من المواد المركبة خلال البحث . [2]

الشكل (3) غطاء الرادار في الطائرات [5]

والتوجهات الحديثة في صناعة المواد المركبة تتضمن صناعة المواد مركبة بحيث يمكن التخلص منها او اعادة تدويرها بعد انتهاء استخدامها وفي هذا المجال نستخدم ألياف الخشب مع مادة رابطة من اصل طبيعي ايضا مثل البوليمرات من اصل نباتي او حيواني لانتاج المواد المركبة الحيوية لتحقيق متطلبات البيئة وذلك كونها موادّ قابلة للتحلل بشكل كامل . يتم الحصول على البوليمرات الحيوية من الزيوت النباتية مثل زيت فول الصويا أو زيت الزيتون او من بعض انواع الدهون الحيوانية إذ تعالج بطرق مختلفة وإضافة مواد بتروكيميائية لتحسين خواصها. تستخدم هذه المنتجات في بعض الصناعات مثل تعبئة المواد الغذائية وكذلك لصناعة بعض اجزاء المكائن الزراعية ومعدات السلامة رغم ان استخدامها لا يزال قيد البحث كما انها لا تتحمل الاجهادات العالية .

فيما يخص المواد المركبة القابلة لإعادة الاستخدام والتدوير والتي تُنتَج من خلال تقوية المادة الرابطة بألياف من جنسها لتشكل مادة مركبة قابلة لإعادة الأستخدام وفي هذا المجال برزت مادة البولي بروبيلين التي ذُكِرت سابقا كمادة رابطة إذ يتم في هذا النوع من المواد المركبة صنع الألياف والمادة الرابطة من نفس المادة إذ تكمن الصعوبة في اعادة التدوير للمواد المركبة كونها مصنوعة

من مادتين مختلفتين يصعب فصلهما لكن في هذه الحالة إذ ان المادة المركبة مصنوعة من مادة واحدة فقط يمكن اعادة استخدامها وذلك بصهرها واعادة تشكيلها وهو ما يحقق مزايا اقتصادية وبيئية مهمة. [2]

3. البوليمرات المقواة بألياف التقوية (Fiber reinforced polymers):

تعدّ البوليمرات المقواة بالألياف الطويلة من اهم انواع المواد المركبة التي سيتم مناقشتها في هذا البحث

أولاً : البوليمرات

هناك نوعان اساسيان من البوليمرات، هما :

1. البوليمرات الثابتة بالحرارة (Thermosets) مثل الايبوكسي ، والبولستر ، والفينولك ، إذ تمتاز هذه المواد بالآتي :
   - عدم امكانية صهرها واعادة استخدامها وبذلك تستخدم مرة واحدة فقط .
   - قصر مدة تخزينها .
   - تحتاج الى التسخين لغرض اكتمال عملية التصلب .
   - تمتلك خواص جيدة في درجات الحرارة المعتدلة حتى 130 درجة مئوية .
2. البوليمرات اللدنة بالحرارة (Thermoplastics) مثل البولي بروبيلين ، والبولي ايثر ، وايثر كيتون ، والتي تتصف بالآتي :
   - امكانية صهرها واعادة استخدامها ويمكن استخدامها اكثر من مرة .
   - جيدة من ناحية المتانة .
   - كلفة عالية لطرق التصنيع فضلا عن كلفة المادة .
   - مشاكل في الالتصاق مع الألياف . [5]

ثانياً : ألياف التقوية:

ومن أهم انواع الألياف المستخدمة لتقوية البوليمرات هي :

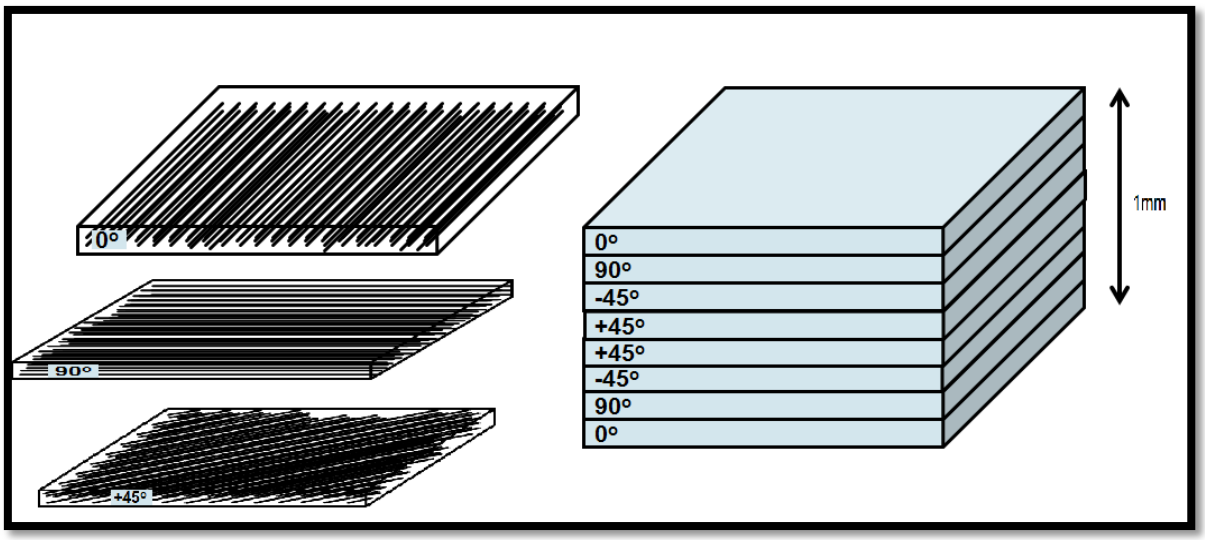
1. ألياف الزجاج: تمتاز بخواص ميكانيكية جيدة بالاضافة الى رخص الثمن، وكذلك فإنها تسمح بنفاذ الموجات الراديوية من خلالها اي تكون شفافة بالنسبة للموجات الراديوية، كما تصنع هذه الألياف على نوعين (E-glass and S-glass) . عند استخدام هذه الألياف لتقوية البوليمير تكتب بالصيغة الآتية: البولمير المقوى بألياف الزجاج (GFRP) Glass Fibre Reinforced Polymer. وعادة ما يستخدم الايبوكسي مع الياف الزجاج والمادة المركبة الناتجة تستخدم في صناعة الاجهزة الرياضية، وحمامات السباحة ، والسيارات ، والطائرات وصناعة الاوعية والانابيب وغيرها الكثير من الاستعمالات.
2. ألياف الكربون: تتميز هذه الألياف بأفضل خواص ميكانيكية وأعلى قوة تحمل ومقاومة مقارنة بالعديد من أنواع الألياف الاخرى وهي غالية الثمن وتستخدم بشكل خاص في صناعة الطائرات والمركبات الفضائية كما تستخدم على نطاق واسع في صناعة الالواح الشمسيه ومولدات الطاقة الهوائية. والمادة المركبة الناتجة عن خلط هذه الألياف مع البوليمير والذي عادة ما يكتب الايبوكسي بالصيغة الآتية : البولمير المقوى بألياف الكاربون (CFRP) Carbon Fibre Reinforced Polymer.
3. ألياف الاراميد أو الكفلار ([Aramid Fibres [Kevlar) : تصنع هذه الألياف من البوليمرات ايضا ولكن خواصها تكون أعلى بكثير من خواص البوليمرات المستعملة في المادة الرابطة إذ تصنع هذه الألياف من سلسلة متراصة من البوليمير . تمتاز هذه المواد بقوة تحمل كبيرة للصدمات وذلك بسبب كون هذه الألياف تفشل بالتليف اي تتحول الى ألياف صغيرة وهذا بدوره يمتص مقدارا كبيرا من الطاقة ولذلك تستعمل هذه الألياف في صناعة الملابس الواقية من الرصاص و الحماية من الألات الحادة.[5,1]

4. ترتيب الألياف في طبقات المواد المركبة (Arrangement of fibers in layers of composite materials):

تُصنَع المواد المركبة على شكل طبقات رقيقة بسمك (0.125 mm) في العادة ، وهذا السمك قد يختلف حسب التصميم المطلوب . يتم ترتيب الألياف في هذه الطبقات بزوايا معينة واكثر الزوايا التي يتم استخدامها هي (0°, 90°, ±45°) وكل زاوية توفر مقاومة للاجهادات بأتجاه زاوية مد الألياف بينما توفر الزاوية 45° الخواص التالية :

- مقاومة لأجهادات القص
- مقاومة الألتواء خصوصاً عند وضعها على سطح المادة المركبة
- مقاومة للصدمات عندما تكون على السطح
- التقليل من تركيز الاجهادات
- المساعدة في تصنيع الأشكال المعقدة

تكون الألياف ضمن الطبقة الواحدة ممدودة بشكل متوازٍ ومرتبة حسب الزوايا المطلوبة وتعرف طريقة الترتيب هذه بـ Unidirectional [UD] وترتيب الألياف بهذه الطريقة يوفر اقصى قوة تحمل ومقاومة للطبقة الواحدة ضمن المواد المركبة كما موضح في الشكل (4). [5]

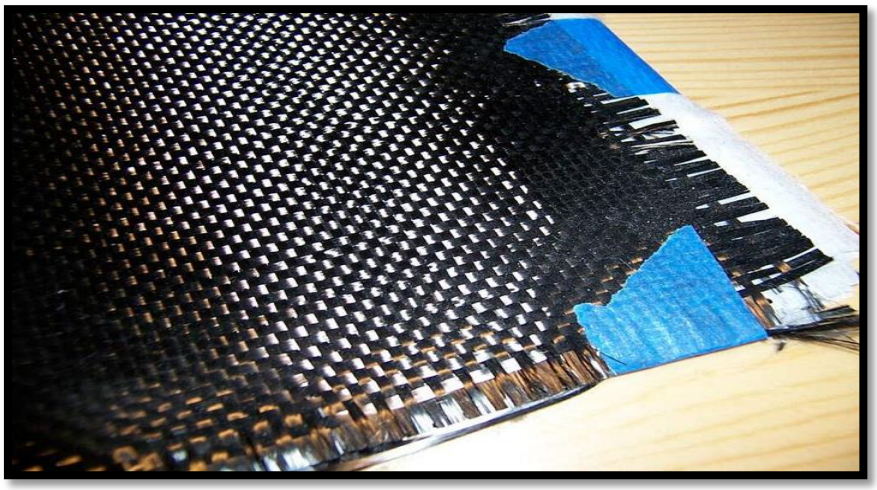


الشكل (4) هيكلية المواد المركبة والطبقات من نوع (UD). [5]

هناك عدة اعتبارات يجب التركيز عليها عند تصميم المواد المركبة للحصول على تصميم جيد ومنها :

1. أن تكون الطبقات متناظرة حول محور يسمى محور التناظر
2. متوازنة من ناحية عدد الزوايا الموجبة والسالبة بالنسبة للزاوية 45° أو اي زاوية اخرى مستخدمة
3. ان تكون الزوايا (±45°) على السطح
4. ان تكون الزاوية (0°) بعيدة عن محور التناظر وذلك لزيادة مقاومة الألتواء [5]

كما يمكن ايضاً ترتيب الألياف للطبقة الواحدة بشكل نسيجي متعامد (Woven) إذ يتم نسج حزم من الألياف وفي هذه الحالة فأن الخواص للطبقة الواحدة ايضا سوف تختلف إذ تقل قوة الطبقة بينما تصبح ذات خواص متناظرة شبيهه بالمعادن إذا كان عدد حزم الألياف متساويًا بالاتجاهين ، كما ويخدم هذه الترتيب في توفير افضل مقاومة للصدمات وكذلك المرونة لتصنيع الاشكال المعقدة بالأضافة الى كونه ارخص ثمناً كما موضح في الشكل (5)



الشكل (5) الطبقات النسيجية (Woven). [6]

5. مميزات ومساوئ المواد المركبة (Advantages and disadvantages of composite materials):

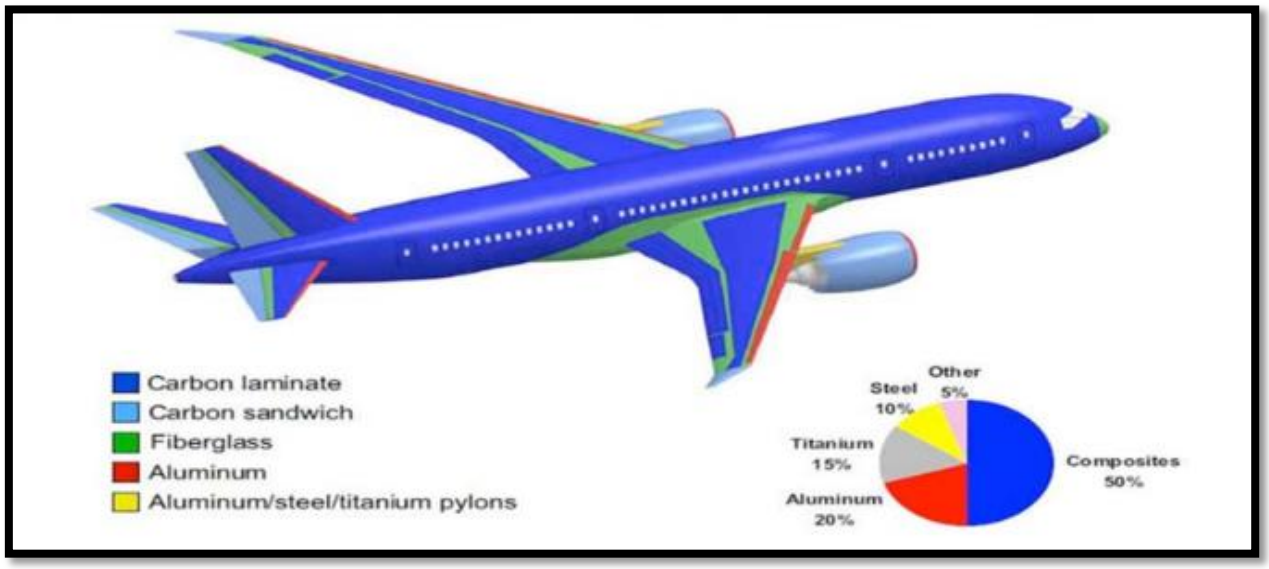
أولاً : مميزات المواد المركبة

تتميز المواد المركبة المصنوعة من البوليمرات المقواة بالألياف بالعديد من المميزات والتي جعلتها تتفوق على الكثير من المواد الاخرى ومن أهم هذه المميزات هي :

1. خفة الوزن.
2. مقاومة عالية وقوة تحمل كبيرة.
3. ممانعة هائلة لعدم انتشار الشقوق أو cracks الذي قد يحدث نتيجة للاهتزاز، ومن ثمّ فهي ممتازة كمحاور دورانية.
4. سهولة تشكيل الأشكال المعقدة وبأحجام وأبعاد كبيرة .
5. مقاومة أكبر للمواد الكيميائية والعوامل الجوية (لا تصدأ) ومقاومة للتآكل.
6. مقاومة عالية لتكرار التحميل وازالة الحمل ولفترات طويلة (Fatigue resistance)
7. تتميز بكونها مواد عازلة جيدة للكهرباء .

هذه المميزات أدت الى زيادة استخدام المواد المركبة خاصة في مجال صناعة الطائرات إذ تستخدم في إنشاء بدن وبعض اجزاء الهيكل الداخلي للطائرات . فيما يأتي مخطط بسيط لتوضيح كيفية تقدم استخدام المواد المركبة في إنشاء الطائرات في الوقت الحالي إذ يبين المخطط أن اكثر انواع المواد المركبة التي تستخدم في صناعة الطائرات هي البوليمرات المقواة بألياف الكاربون كما في البوينج دريملاينر 787 أو الأيرباص 380 كما موضح في الشكل (6) .

أن استخدام المواد المركبة في صناعة الطائرات ادى الى تقليل استهلاك الوقود ومن ثمّ انخفاض نسبة انبعاث غاز ثاني اوكسد الكاربون بمقدار 15% تقريبا فضلا عن زيادة مدى الطيران . [5]



الشكل (6) تزايد استخدام المواد المركبة في صناعة الطائرات .[7]

ثانياً : مساوئ المواد المركبة

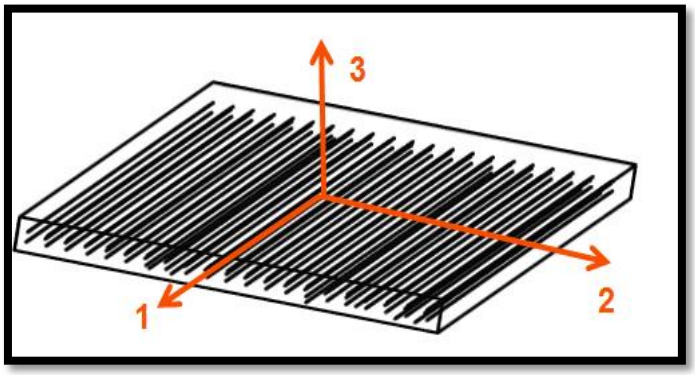
1. الكلفة العالية لبعض انواع المواد المركبة مثل المواد المركبة المصنوعة من ألياف الكربون اما ألياف الزجاج فتعدّ ارخض ثمناً بالمقارنة مع الأجزاء المصنوعة من المعادن .
2. بعض الصعوبات في عملية التصليح .
3. قلة مقاومة الصدمات إذ يشار إلى أن المثلب الأكبر للمواد المركبة من الناحية الهندسية هو ضعف قدرتها على تحمل الأحمال الصدمية الديناميكية إذ يتسبب ذلك غالبًا في الانفصال الطبقي للمادة وتعرض المادة المركبة للكسر .
4. المواد الداخلة فيها مواد ثابتة وغير متحللة. لكن هذه الخاصية أصبحت في الآونة الأخيرة غير مرغوب فيها نظرًا لصعوبة التخلص من هذه المنتجات بعد انتهاء عمرها الافتراضي. وهناك طريقتان تقليديتان للتخلص منها، أولاهما بوضعها في مدافن خاصة، والثانية بحرقها في محارق خاصة لتحويلها إلى غازات. والطريقة الأولى تسبب وجود نفايات دائمة لأنها لا تتحلل، وتتطلب لاحقا مساحات كبيرة من الأراضي، في حين تسبب الطريقة الثانية تلوثًا للبيئة. وكلاهما تسببان مشكلات بيئية كبيرة، إضافة لارتفاع كلفة الطريقتين من ناحية أخرى. وإذا كانت المنتجات المعدنية يمكن إعادة استخدامها بصهرها من جديد، فالمنتجات المصنعة من المواد المركبة غير قابلة للتدوير وإعادة الاستخدام نظرًا لأنها تتألف من مادتين مختلفتين.
5. مقاومتها الحرارية لا تزال منخفضة إذ تتغير خواصها مع ارتفاع درجة الحرارة وبالنسبة للمواد المركبة المصنعة من البوليمرات فأن اقصى درجة حرارة تعمل بها ما بين 130 -

200 درجة مئوية في بعض انواع الايبوكسي الخاص للاستعمال الحراري مع ألياف الكاربون .[5,2]

6. الخواص الميكانيكية للمواد المركبة (Mechanical properties of composite materials) :

من أهم المزايا التي تتصف بها المواد المركبة مرونة التصميم ، إذ يستطيع المهندس أن يصممها بحيث يضع الألياف في اتجاه الأحمال، مما يؤدي إلى استخدام أمثل للمادة، ويؤدي من ثم إلى انخفاض أكبر في وزن الإنشاء النهائي.

يعود السبب في ذلك الى عدم تناظر الخواص بالنسبة للمواد المركبة مقارنة بالمواد الاخرى مثل المعادن والسبائك إذ ان الخواص الميكانيكية في اتجاه الألياف للطبقة الواحدة من المواد المركبة والذي يشار أليه بالرقم (1) تكون اقوى من الاتجاه الاخر العمودي على الألياف او العرضي ويرمز له بالرقم (2) بينما يشير الرقم (3) الى الخواص خلال السمك ، كما موضح بالشكل (7) بأستثناء الطبقات النسيجية والتي من الممكن ان يتساوى فيها عدد حزم الألياف في الاتجاهين ومن ثم تكون الخواص متناظرة كما شرحناه سابقاً.[5]



الشكل (7) خواص المواد المركبة بالاعتماد على أتجاه الألياف .[5].

أن الخواص الميكانيكية للمواد المركبة تعتمد على خواص كل من ألياف التقوية والمادة الرابطة والتي تمثل بمجموعها خواص المادة المركبة .

بشكل عام يمكن تلخيص بعض العوامل المؤثرة في خواص المواد المركبة كما يأتي :

1. خواص ألياف التقوية وخواص المادة الرابطة .
2. ترتيب و اتجاهات او زوايا الألياف في الطبقات .
3. النسبة الحجمية او كمية الألياف في المادة المركبة.
4. طول وقطر الليف .

وبالأضافة الى ما سبق تأخذ الكلفة بعين الاعتبار عند تصميم واختيار المواد المركبة كما هو الحال في تصاميم للمواد الهندسية الاخرى . [5,2]

7. طرق تصنيع المواد المركبة (Methods of manufacturing composite materials)

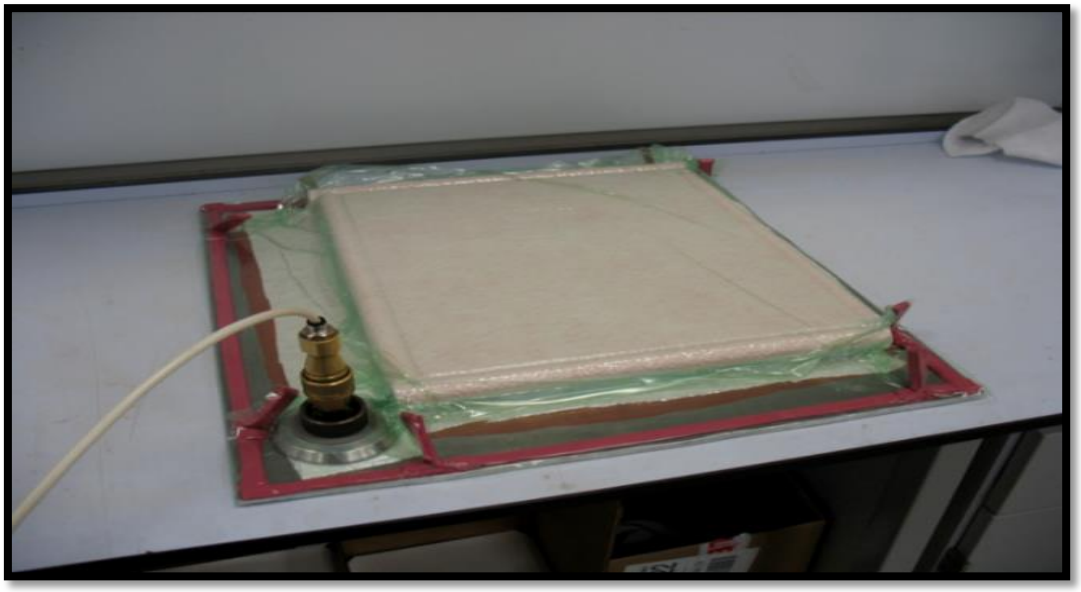
تُصنَع المواد المركبة وتُشكَّل بعدة طرق اعتماداً على نوع المنتج وشكله وخواصه المطلوبة فضلاً عن سرعة انتاج عدد كبير من القطعة نفسها فضلا عن الكلفة يمكن تقسيم طرق التصنيع للمواد المركبة الى جزئين:

أولا : طرق تحضير المادة المركبة

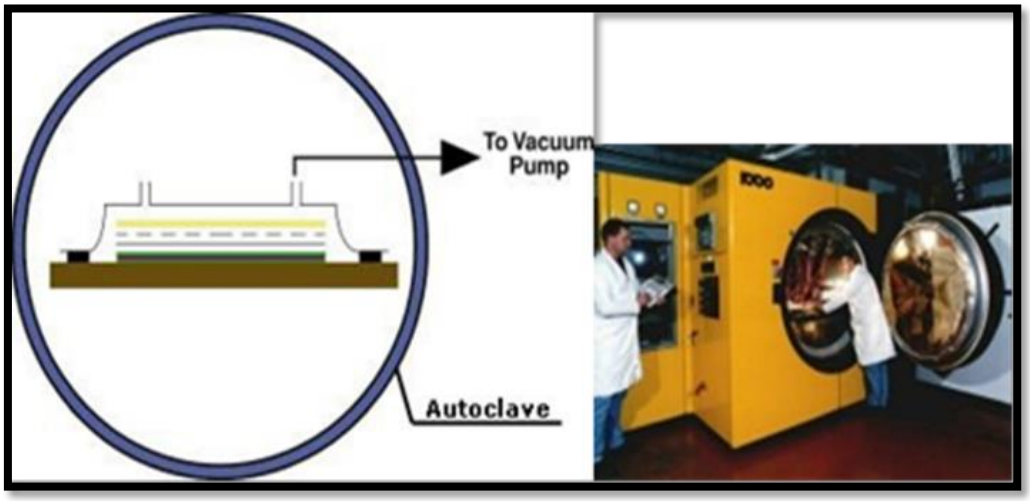
1. طريقة المعاملة المسبقة Pre-impregnated : وتتضمن هذه الطريقة اضافة المادة الرابطة (البوليمير) الى الألياف بشكل مسبق ومعاملته بشكل جزئي ومن ثم خزنه على شكل صفائح او طبقات رقيقة مغلفة وملفوفة على شكل بكرات كما يمكن انتاج خيوط او شريط من الألياف المعاملة وتكون على شكل بكرات ايضاً إذ يتم حفظها في برادات او ثلاجات خاصه لحين الاستخدام و تبقى هذه البكرات صالحة للاستخدام لمدة سنة او سنتين بعد الانتاج . تعطي هذه الطريقة افضل خواص ميكانيكية عن باقي طرق تصنيع المواد المركبة لكنها غير مجدية للانتاج بكميات كبيرة بالأضافة الى الكلفة العالية.
2. الطريقة المباشرة : تعني الاحتفاظ بالألياف جافة إذ تُضاف المادة الرابطة في القالب بعد اكتمال ترتيب الألياف إذ تكون الألياف على شكل طبقات او خيوط ملفوفة على بكرات. يوتُضاف المادة الرابطة بشكل سائل او استخدام طبقات جافة من المادة الرابطة والتي تذوب بالحرارة . [5]

ثانياً : طرق تصنيع المنتج المطلوب

ولغرض تصنيعها حسب الشكل المطلوب يتم تقطيع هذه الطبقات حسب الزوايا المطلوبة وكذلك ترتيب طبقاتها وسمكها بشكل ملائم للتصميم ووضعها في القالب الخاص بالمنتج ويتم تغليفها بكيس من البلاستك ويتم تفريغه من الهواء ، كما موضح في الشكل (8) وتسخينها بدرجة حرارة تصل حتى 180°C وضغط 7 bar في فرن خاص يسمى (autoclave) كما موضح في الشكل (9) لحين اكتمال تفاعل وتصلب المادة الرابطة إذ يكون المنتج كامل التصنيع ولا يحتاج الى اعمال تشغيل اضافية هذا في حالة الألياف مسبقة التعامل .[5]

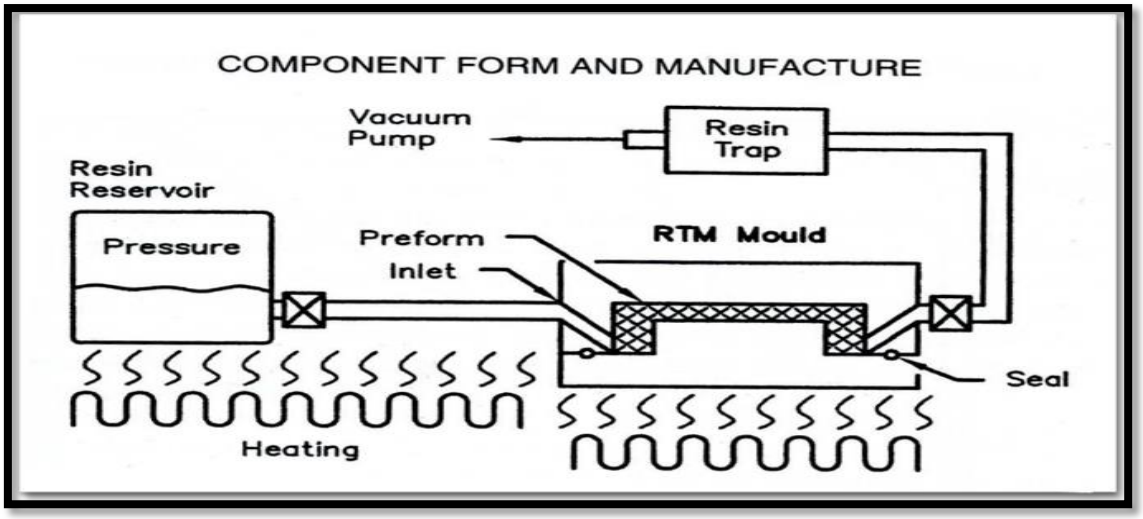


الشكل (8) طبقات الألياف مسبقة التعامل مرتبة على قالب موضوعة في كيس مفرغ من الهواء [5]



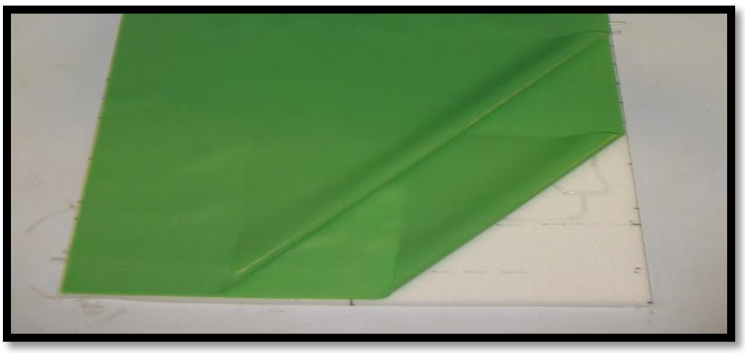
الشكل (9) يوضح وضع المادة المركبة في الفرن من نوع (autoclave) لغرض اكتمال التصنيع [5]

اما الألياف الجافة فأن تصنيعها لا يتطلب تسليط ضغط وعند ترتيبها ضمن القالب يتم رش او وضع المادة الرابطة مباشرة على الألياف وتترك لتجف في حالة استخدام طريقة التصنيع اليدوية واذا كانت المادة الرابطة لا تحتاج الى الحرارة لتتصلب . ولغرض تقليل الفجوات وزيادة دقة التصنيع فأن المادة الرابطة يتم حقنها في كيس بلاستيكي مع قالب محكم الاغلاق ومفرغ من الهواء وتكون الألياف مرتبة في الكيس داخل القالب ويتم تسخينها اذا كانت تتصلب بالحرارة كما موضح في الشكل (10).[5]



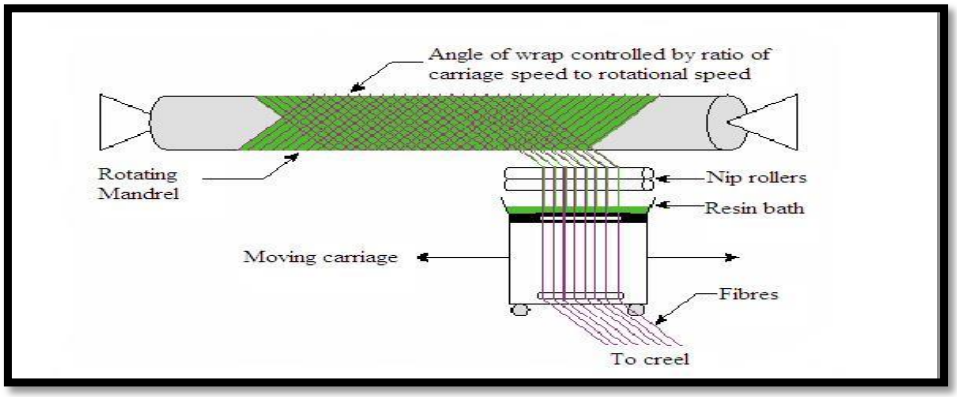
الشكل (10) استخدام قالب محكم الأغلاق ومفرغ من الهواء مع حقن المادة الرابطة على الألياف الموضوعة في القالب وتسخينها .[5]

في بعض الحالات تستخدم طبقات من المادة الرابطة المعاملة بشكل جزئي والتي تُرتّب بين طبقات الألياف إذ يتم التسخين لحين اكتمال انصهار المادة الرابطة وتصلبها مجدداً كما موضح في الشكل (11) .



الشكل (11) طبقات المادة الرابطة نصف المعاملة .[5]

كما استخدمت المواد المركبة في صناعة الأنابيب وأوعية الضغط وذلك من خلال استخدام بكرات خيوط او اشرطة الألياف ولفها حول قالب من البلاستك او المعدن والذي بدوره يمثل بطانة الأنبوب او الوعاء ، وفي بعض الحالات يمكن استخراج البطانة بعد انتهاء عملية التصنيع . يمكن استخدام الخيوط مسبقة التعامل بالمادة الرابطة او الخيوط الجافة بعد ان يتم تمريرها بحوض من المادة الرابطة قبل لفها كما موضح في الشكل (12) إذ يتم لف الخيوط بزاويا محدد تتلائم مع الاجهادات المسلطة . [5]



الشكل (12) طريقة لف الألياف الجافة لتصنيع الأوعية [8]

وكذلك يمكن استخدام طبقات من الألياف بنوعيها الجاف ومسبق التعامل وتربيها بشكل يدوي على البطانة المعدنية او البلاستيكية لصناعة الاوعية والخزانات إذ تُرتَّب هذه الطبقات حسب الزوايا والسمك المطلوب كما موضح في الشكل (13) .

الشكل (13) ترتيب طبقات المواد المركبة بشكل يدوي لصناعة الأوعية والخزانات [9]

8. المواد المركبة في الصناعات النفطية (Composite materials in the oil industry)

في مجال الصناعات النفطية تزايد استخدم المواد المركبة في الثلاثين سنة الماضية وخاصة في المنشآت والمنصات النفطية البحرية اضافة الى معدات حفر الأبار النفطية وخطوط نقل النفط الخام والغاز إذ دفعت كلفة استبدال الانابيب المعدنية وزيادة الوزن في حالة المنشئات البحرية فضلا عن مقاومة التأكل الى زيادة استخدام المواد المركبة في الصناعات النفطية . ومن اهم انواع المواد المركبة المستخدمة في الصناعات النفطية هي البوليمرات المقواة بألياف التقوية إذ تسخدم في صناعة الأنابيب والأوعية فضلا عن استخدامها في صناعة الاجزاء الثانوية من هياكل المنشئات النفطية مثل السلالم والممرات ومساند خطوط الكهرباء ويمكن تلخيص استخدام المواد المركبة في الصناعات النفطية بالنقاط التالية [11,10] :

أولا : صناعة الأنابيب والأوعية

في احصائية اعدتها وكالة ناسا تم تقدير حجم الخسائر في الصناعة الامريكية بحوالي 300 مليار دولار سنويا وان ما مجموعه حوالي 150 مليار دولار من هذه الخسائر يمكن تجنبه من خلال وضع الحلول المناسبة لمشكلة التآكل كما وجد ان الصناعة النفطية وحدها تتكبد خسائر قدرت بعدة بلايين من الدولارات سنويا نتيجة التآكل في الانابيب . هناك عدة طرق للحماية من التآكل وتقليل الاضرار الناتجه عنه لكن وجد ان احد افضل هذه الطرق هو استخدام الانابيب

المصنوعة من المواد المركبة لما لها من مقاومة للمواد المسببة للتآكل في مجال الصناعات النفطية مثل كبريتيد الهيدروجين (H2S) والمواد الاخرى مثل حامض الهيدروكلوريك HCL والصودا الكاوية NaOH إذ يسهم استبدال انابيب الحديد الكاربوني بالانابيب المصنوعة من المواد المركبة في انخفاض الكلفة المترتبة على استبدال هذه الانابيب فضلا عن توفير الجهد المبذول في تصنيع واعادة تركيب هذه الانابيب كما موضح في الشكل (14) الذي يوضح شبكة من الانابيب وملحقاتها المصنوعة من المواد المركبة . [11,10]

الشكل (14) مقاطع الأنابيب وبعض ملحقاتها المصنوعة من المواد المركبة [12]

أن مقاومة المواد المركبة للتأكل في الصناعات النفطية تؤدي الى انخفاض كبير في كلف استبدال قطع الانابيب المصنوعة من الحديد الكاربوني او المعادن والسبائك الاخرى المقاومة للصدأ مثل الحديد المقاوم للصدأ وسبائك النيكل والتيتانيوم إذ تستخدم الأنابيب المصنعة من المواد المركبة في شبكات الاطفاء وشبكات مياه البحر المستخدمة للتبريد وشبكة ماء الشرب وشبكات التصريف وغيرها كما تستخدم الانابيب المصنوعة من المواد المركبة ايضا في نقل النفط الخام تحت ضغط عالي كذلك فأن جدرانها الصقيلة تمنع ترسب النفط الخام والمواد الثقيلة الاخرى على الجدران الداخلية للأنابيب . تستخدم هذه الأنابيب للتطبيقات المتخصصة مثل الانابيب ذات الاقطار الكبيرة وشبكات انابيب الضغط العالي المقاومة للتآكل والتي قد تمتد على طول عدة آلاف من الكيلومترات.[11,10] .

وقد تطور استخدام المواد المركبة في صناعة الانابيب إذ تم تصنيع انابيب البلاستك المقواة بالمواد المركبة وتسمى الأنابيب البلاستيكية الحرارية المقواة Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) كما موضح في الشكل (15) المستخدمة للانشاء السريع لخطوط انابيب النفط والغاز إذ يتم نقلها على شكل بكرات مما يسهل عملية نقل ومد خطوط الانابيب كما موضح في الشكل (16) .[14,13,11,10]

الجدوى الفنية والاقتصادية من استخدام الأنابيب البلاستيكية الحرارية المقواة Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP)

1. غير قابلة للتآكل والصدأ ومقاومة لجميع المواد الكيميائية الموجودة في الهيدروكربونات بما في ذلك H2S CO2 والاحماض غير العضوية القوية مثل HCl و H2SO4 و المواد القلوية القوية ومنها NaOH و KOH و NH3 . كما يمتاز بمقاومته للصدأ في البئية الرطبة او عند مد الانابيب في البحر .
2. خفيفة الوزن مما يسهل حملها ونقلها وهي اقل وزنا من الانابيب المعدنية والبلاستيكية العادية
3. مقاومة عالية للضغوط التشغيلية تصل إلى (689 bar) .
4. سهولة التركيب وتوصل الأنابيب ببعضها، أي سرعة في التركيب مما يترتب عليه سرعة في انجاز المشاريع وبوقت تركيب أسرع مقارنة بالأنابيب الفولاذية التقليدية ، إذ تم الوصول إلى سرعات تصل إلى 4 كيلومتر في اليوم عند تركيب RTP .
5. سهولة اعداد وتأهيل الكادر على تركيبها ولحامها مقارنة بانابيب الكاربون ستيل والتي تتطلب عاملين ماهرين ولحامين. ولا تحتاج لمعدات ضخمة وثقيلة لتركيبها ولحامها. اضافة لقلة عدد وصلات اللحام.

الشكل (15) أنابيب البلاستك المقواة بالمواد المركبة RTP [13]

الشكل (16) بكرات نقل أنابيب البلاستك المقواة بالمواد المركبة RTP [13]

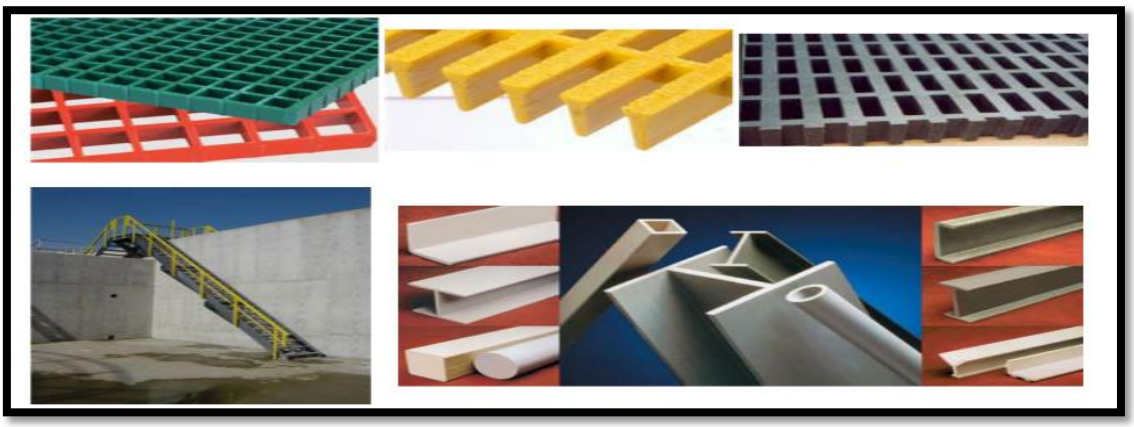
كما يتم صناعة الخزانات من مادة الأيبوكسي المقواة بالألياف الزجاجية لخزن المنتجات النفطية فضلا عن اوعية الضغط المصنوعة من المواد المركبة والتي تمتاز بتحملها للضغوط العالية ومتانتها كما انها مقاومة للتأكل إذ وجد ان اوعية الضغط المصنوعة من المواد المركبة تتحمل ضغوط اعلى من تلك المعدنية بينما تصل نسبة انخفاض الوزن في هذه الأوعية الى الثلث فضلا عن انخفاض الكلفة [14]

كما تستخدم المواد المركبة في معالجة وقطع النضوحات في الانابيب والأوعية في المقاطع الصعبة الاستبدال او التصليح بالطرق التقليدية او في حالة عدم امكانية ايقاف وعزل الأنبوب كما وانها تسهم في تقليل تكاليف الاستبدال وزيادة العمر التشغيلي للأنابيب التي يتم صيانتها بالأضافة الى حماية القطع التي تم معالجتها من التأكل الخارجي . تستخدم المواد المركبة في معالجة الأنابيب التي ينخفض سمكها حتى 80% من السمك الاصلي إذ تستخدم ألياف التقوية مع احد انواع البوليمرات مثل الأيبوكسي لمعالجة النضوحات كما موضح في الشكل (17).

الشكل (17) معالجة نضوحات الأنابيب بأستخدام المواد المركبة [15]

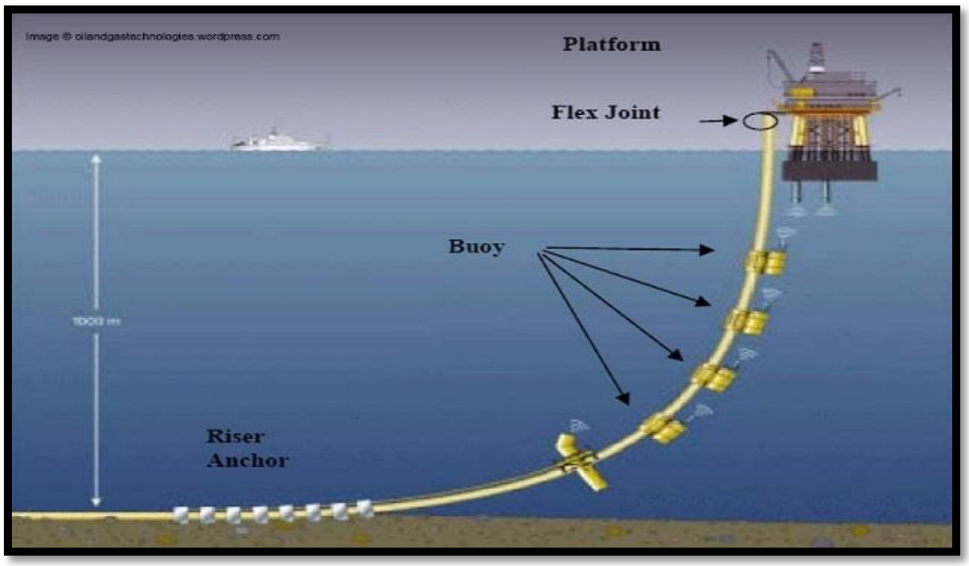
ثانيا : اجزاء الهيكل الثانوية

تستخدم المواد المركبة في صناعة الاجزاء الثانوية من هياكل المنشئات النفطية مثل السلالم والممرات ومساند خطوط الكهرباء . أن مقاومة المواد المركبة للتاكل وخفة الوزن والعمر التشغيلي الطويل يسهم في تقليل كلفة استبدال وصيانة هذه المقاطع . وبالمقارنة مع المواد الاخرى المستخدمة في صناعة هذه الاجزاء مثل الالمنيوم او الخشب فان الاجزاء المصنوعة من المواد المركبة تتميز بعدم امتصاصها للماء والتعفن في حالة الخشب هذا بالأضافة الى مقاومتها للكثير من المواد الكيمياوية المسببة للتاكل كما انها عازلة للكهرباء مما يوفر امان اكثر للعاملين من مخاطر التيار الكهربائي العالي مقارنة مع الاجزاء المصنوعة من المعادن مثل الالمنيوم . بالأضافة لما سبق فأن الأجزاء المصنوع من المواد المركبة يمكن صبغها بحيث يتم اضافة الصبغ مع المادة الرابطة وبذلك فأنها تحافظ على لونها حتى في حالة تعرضها للخدش او التقشر ولا تحتاج الى صبغ اضافي كما موضح في الشكل (18) [14].



الشكل (18) تلوين المقاطع والاجزاء المصنوعة من المواد المركبة [14]

اما في ما يخص المنشآت النفطية البحرية فيمكن القول أن انخفاض وزن المنصه البحرية نتيجة استبدال الانابيب المعدنية الثقيلة بالانابيب المصنوعة من المواد المركبة بالاضافة الى الاجزاء الثانوية من هيكل المنصة يؤدي الى انخفاض الوزن وزيادة قابلية الطفو للمنصة ومن ثمّ التقليل من الهيكل الحديدي المطلوب تحت سطح البحر للمحافظة على المنصة ومن ثمّ الى انخفاض كلفة انشاء المنصات البحرية بشكل كبير. وقد وجد ان النسبة الاجمالية لانخفاض الوزن في بعض الحالات يصل حتى 80% من الوزن الاصلي . ان واحدًا من اهم الاستخدامات للمواد المركبة في مجال المنصات النفطية يكمن في استخدامها في صناعة الانبوب الصاعد وهو انبوب بقطر كبير يربط بين معدات الحفر في قاع البحر وبين المنصة البحرية الطافية على السطح إذ قد يصل عمق الماء الى اكثر من (1000) متر مما يجعل وزن هذا الانبوب احد العناصر المحدد في التخطيط لهذه المشاريع نظرا للوزن الكبير لهذا الأنبوب ومشاكل التأكل نتيجة المواد النفطية داخله او التأكل بسبب مياه البحر المالحة فضلا عن الاجهادات المسلطة عليه نظرا لطول المسافة . وفي احدى الدراسات التي اجرتها شركة (Chevron) الامريكية إذ قامت باجراء اختبار على انبوب صاعد مصنوع من الحديد المقاوم للصدأ واخر من المواد المركبة وبنفس الطول وتم تصميمها بحث تتحمل اجهادات متساوية وجد ان الوزن قد انخفض بمقدار 65% للأنبوب المصنوع من المواد المركبة . ان هذا الانخفاض في الوزن ساعد الشركات النفطية على استكشاف وحفر واستثمار الحقول النفطية في المياه العميقة [14] كما موضح في الشكل (19).



الشكل (19) ألانبوب الصاعد في المنصات النفطية. [16]

9. الاستنتاجات

في ضوء ما تقدم يمكن تلخيص أهمية أستخدام المواد المركبة في الصناعة وبشكل خاص الصناعة النفطية بعدة امور منها:

1. خفة الوزن مع القوة والمقاومة العالية والتي اصبحت احد العوامل الأساسية في تطوير بعض انواع الصناعات مثل صناعة السيارات والطائرات والسفن فضلا عن المنشآت النفطية البحرية .
2. مقاومة التأكل الناتج من العوامل الجوية الطبيعية او الناتج من التعرض للمواد الكيميائية احدا أهم المميزات التي تخدم الصناعات النفطية .
3. أن السطوح الدخلية الصقيلة تساعد على التقليل من خسائر انخفاض الضغط كما انها تمنع الترسبات على الجدران الداخلية للأنابيب .
4. تعدّ المواد المركبة عازلة جيدة للحرارة والكهرباء .
5. الأنابيب والمقاطع الاخرى المصنوعة من المواد المركبة أرخض ثمناً وأطول عمراً كما أن كلفة تنصيبها وتفصيلها تعد منخفضة بالمقارنه مع الانابيب المعدنية .
6. سهولة تشكلها حسب الشكل المطلوب .
7. تستخدم المواد المركبة في معالجة وقطع النضوحات وخاصة في حالة عدم امكانية ايقاف وعزل الأنبوب .

بينما تعد قلة مقاومة الصدمات والمقاومة المنخفضة لدراجات الحرارة العالية احد اهم المعوقات التي تواجه استخدام المواد المركبة في الصناعة إذ أن استخدام المواد المركبة المقاومة للصدمات يعدّ مكلفاً بينما لا يزال البحث جاريا لزيادة مقاومة المواد المركبة لدرجات الحرارة العالية .

10. التوصيات

يوصي بأستخدام المواد المركبة بعد دراسة الجدوى الاقتصادية والحاجة لها من قبل الشركات النفطية من خلال استبدال بعض الانابيب والأوعية والتي تكون اكثر عرضة للتآكل من غيرها.

المصادر

[1] المواد المركبة :Online. Available at: http://repository.uobabylon.edu.iq/2010_2011/3_3018_67.pdf
(Accessed 11th March 2023)

[2] محمود نديم نحاس ، 2005، أحدث التطورات في مجال المواد المركبة – المواد المركبة الصديقة للبيئة والقابلة لإعادة الاستخدام ، مجلة جامعة الملك عبد العزيز: العلوم الهندسية، م 16 ، ع 1، ص ص 77- 102

[3] Fundamentals of composite materials A100 - CKN Knowledge in Practice Centre [Internet]. compositeskn.org. Available from: https://compositeskn.org/KPC/A100
(Accessed 13th March 2023)

[4] Mahmoud, Osama & Radwan, Ahmed. (2016). Analysis and Material Design of Missiles Structures.

[5] Ganem A. Design and Manufacturing processes for a Composite Overwrapped Pressure Vessel at Minimum Mass. unpublished; 2015.

[6] مادة مركبة ، Online. Available at: https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D8%A7%D8%AF%D8%A9_%D9%85%D8%B1%D9%83%D8%A8%D8%A9
(Accessed 15th March 2023)

[7] Worries about new composite made airplane, Online. Available at: http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html
(Accessed 15th March 2023)

[8] Kavekar M, Khatawate VH, Patil GV, July - August 2013, WEIGHT REDUCTION OF PRESSURE VESSEL USING FRP COMPOSITE MATERIAL. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), ISSN 0976 – 6340(Print), ISSN 0976 – 6359(Online), 4 (4).

[9] Fergusson G, Pons D, Nomeir R, Stephens D, Scola R. PRESSURE VESSEL DESIGN USING COMPOSITE MATERIALS, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Rutgers University Piscataway, New Jersey 08854. No date

[10] M. Enamul Hossain, 2011,The current and future trends of composite materials: an experimental study, Journal of Composite Materials 45(20) 2133–2144

[11] Use of composite materials in the Oil and Gas Industry, Online. Available at: https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/oil-and-gas
(Accessed 15th March 2023)

[12] FRP Pipes Up to 50 Years Service Life Available from: https://www.cofiberial.com/products/frp-pipe/frp-pipes.html
(Accessed 15th March 2023)

[13] TCP Flowlines Strohm Available from : https://strohm.eu/tcp-flowlines
(Accessed 15th March 2023)

[14] Trifunović Prvoslav, (2011) ,USE OF COMPOSITE MATERIALS IN OIL INDUSTRY, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, UNDERGROUND MINING ENGINEERING 19 157-164, Đušina 7, 11000 Belgrade, Serbia, e-mail: trifp@rgf.bg.ac.rs

[15] Advanced Composites for Infrastructure Repair, HJ3 Composite Technologies, Online. Available at:

https://hj3.com/our_project/marine-terminal-pipe-repair/

(Accessed 15th March 2023)

[16] Ensuring the structural integrity of deepwater risers, TWI Group websites, Online. Available at:

http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/ensuring-the-structural-integrity-of-deepwater-risers-595/

(Accessed 16th March 2023)