

الباب الخامس

البلمرة التكثيفية

obeikandi.com

الباب الخامس

البلمرة التكثيفية

Condensation Polymerisation

تنشأ هذه البوليمرات من بلمرة مونومير واحد أو أكثر على شرط أن يحتوى كل مونومير على مجموعتين دالتين functional groups ، فى حالة تحضير البوليمرات الخيطية Linear polymers ، وعلى أكثر من مجموعتين لتحضير البوليمرات المتشابكة Crosslinked Polymers .

وفى حالة البلمرة التكثيفية ترتبط جزيئات المونوميرات مع بعضها لتكوين الداى مير والتراى مير والتترامير ... وهكذا ، أى أن المونومير يختفى منذ المراحل الأولى من التفاعل مؤلفاً جزيئات مؤلفة من وحدات تركيبية متعددة Oligomers ، ثم ترتبط هذه الجزيئات الوسطية ، فيتضاعف طول السلاسل البوليمرية وذلك فى المراحل الأخيرة من التفاعل مكونة جزيئات بوليمرية ذات أوزان جزيئية عالية.

وتمتاز البوليمرات التكثيفية بشكل عام بوجود مجاميع رابطة Interlinkage groups بين الوحدات التركيبية ويعتبر هذا الاختلاف جوهري بين بوليمرات الإضافة والبوليمرات التكثيفية ، ويوضح الجدول المجاميع الرابطة لبعض البوليمرات التكثيفية .

ولقد وجد إن الحركية Kinetics التى تتم بها البلمرة التكثيفية تختلف إلى حد كبير عن حركية البلمرة ذات النمو المتسلسل ، ففى البلمرة ذات النمو المتسلسل تنشأ كل جزيئة بوليمرية من مركز فعال وبتفاعل متسلسل واحد

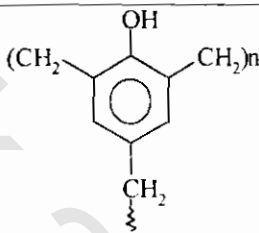
وفى وقت قصير جداً وعندما ينتهي التفاعل المتسلسل فإن الجزيئية البوليمرية لا تعاني أية تفاعلات أخرى عدا تفاعلات انتقال السلسلة النامية Chain tranfer .

وعلى ذلك ، ففي البلمرة ذات النمو المتسلسل لا يحصل هناك أى تغير فى الوزن الجزيئي بعد أن يتكون البوليمر ، بينما فى البلمرة التكتيفية فإن جزيئة البوليمر تتكون من عدة تفاعلات منفصلة، ففي المراحل الأخيرة فقط تحدث معظم التفاعلات بين جزيئات البوليمر المتوسطة الوزن وبذلك فإن الوزن الجزيئي فى هذا النوع من البلمرة يزداد كلما استمرت عملية البلمرة .

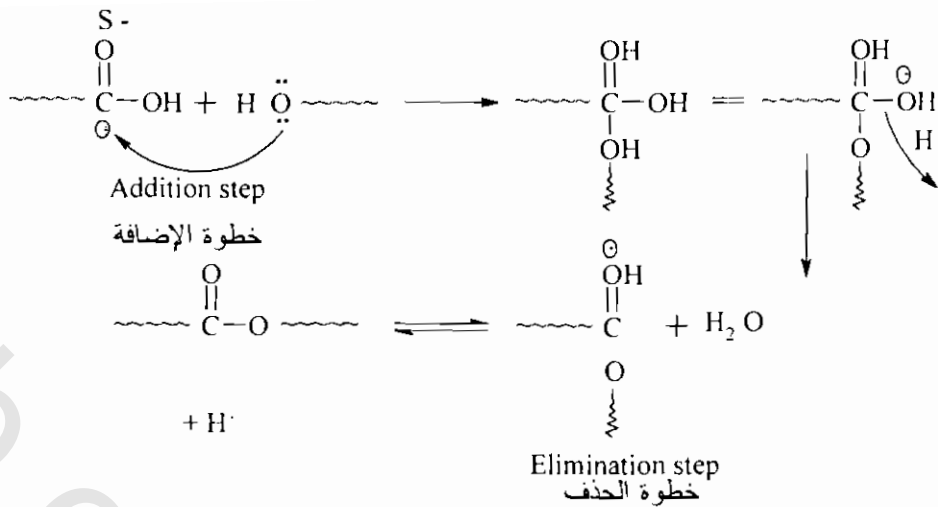
جدول تركيب بعض البوليمرات التكتيفية

المجموعة الرابطة Interlinkage group	التركيب الكيميائي للوحدة المتكررة	البوليمر
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{O}- \end{array}$	$\text{HO} \left(\text{OC}-\text{R}-\text{CCOOR}'-\text{O} \right)_n \text{H}$	بولي استر Polester
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{O}-\text{C}-\text{O} \end{array}$	$\left(\text{RO}-\text{C}-\text{O} \right)_n$	بولي كربونات Polycarbonate
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{N}-\text{C}- \end{array}$	$\text{H} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{H}(\text{NR}-\text{N}-\text{C}-\text{R}'-\text{C}-)n \text{OH}$	بولي أميد Polyamide
- O -	$(\text{R}-\text{O})_n$	بولي ايثر Polyether
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{O}-\text{C}-\text{O} \\ \\ \text{R} \end{array}$	$\left(\text{O}-\text{C}-\text{O} \right)_n$	بولي اسيتال Plyacetal

تابع جدول تركيب بعض البوليمرات التكتيفية :

-O-C(=O)-NH-	$\text{H (OR - OC(=O) - NH - R' -)}_n \text{NCO}$	بولي يوريثان Polyurethane
-C(=O)-NH-	$\left(\text{C(=O)-NH} \right)_n$	بولي يوريا Polyurea
-C-O-C-	$\left[\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4\text{-O} \right]_n$	سليولوز Cellulose
$\text{-CH}_2\text{-}$		راتنجات الفينول فورمالدهيد Phenol- Formaldehyde resin
-S-	$(\text{R - S})_n$	بولي كبريتيد Polysulphide
-Si-O-	$\text{HO (Si} \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{---} \\ \text{O} \\ \text{---} \\ \text{R} \end{array} \text{)}_n \text{H}$	بولي سايلوكسان Polysiloxane
$\text{-N-CH}_2\text{-}$	$\left(\text{-CH}_2\text{-N(=O)-CH}_2\text{-} \right)_n$	راتنجات - اليوريا فورمالدهيد Urea-Formaldehyde resin

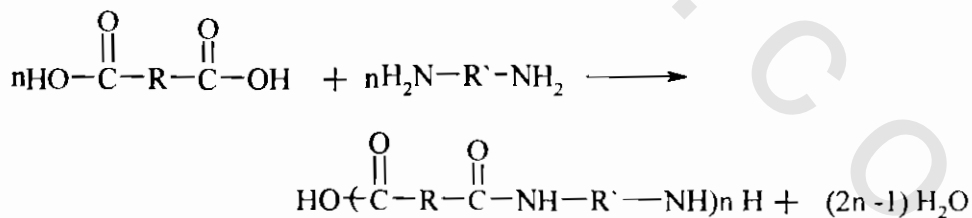
وعند تحضير البولي استرات حيث أن جزءاً من مجاميع الهيدروكسيل الموجودة في الكحول ربما تخرج بشكل ماء كما هو مبين في المعادلات الآتية:



ويشمل هذا الصنف عدداً كبيراً من التفاعلات أهمها :

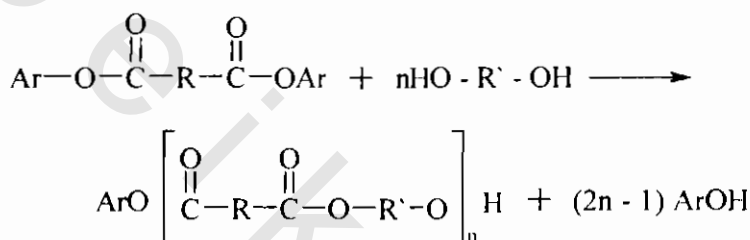
أولاً : تفاعلات الأحماض الكاربوكسيلية الثنائية القاعدة مع المركبات الثنائية الأمين :

لتكوين البولي أميدات Polyamides . يمكن إتمام هذه التفاعلات باستعمال بعض العوامل المساعدة مثل الأحماض القوية أو أملاحها ينجز التفاعل بتسخين المواد المتفاعلة فيتكون الماء كناتج عرضي ويزال من وسط التفاعل تحت ضغط مخفض .



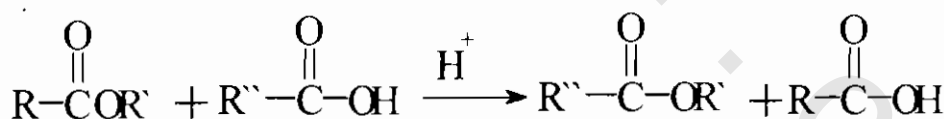
ثانياً : تبادل أو انتقال الاستر :

يتم هذا التبادل عادة بوجود عامل مساعد قاعدي أو حامضي ، ومن القواعد المستخدمة كعوامل مساعدة : PbO , $Mg(OR)_2$, $R - ONa$ ، وبورات الخارصين $Zn(BO_3)_2$ وغيرها . ويسمى التفاعل هذا أحياناً بالتحلل الكحولي Alcoholysis أى تفاعل الكحول (من الأفضل اليفاتي) مع الإستر (نو جزء كحولي أروماتي) يتم هذا النوع من التفاعل:



ثالثاً : تبادل مجموعة الأسيل في الإسترات :

يتم هذا التفاعل بين أستر وحامض كاربوكسيلي بوجود عامل مساعد حامضي عادة حيث يحدث تبادل بين مجموعة الاسيل ($R - CO$) العائد للأستر والحامض كما يلي :

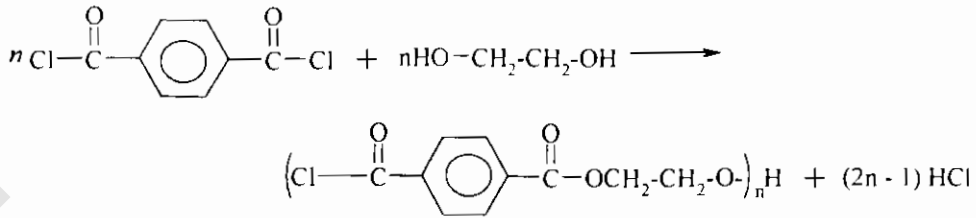


رابعاً : تفاعل الكلوريدات الحامضية الأحماض اللامائية :

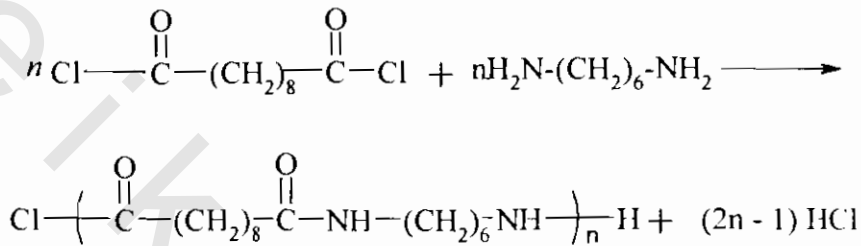
Reactions of acid chlorides and anhydrides

تمتاز كلوريدات الأحماض Acid chlorides والأحماض اللامائية Anhydrides بفعاليتها الشديدة للتفاعل مع الجلايكولات أو المركبات الثنائية

الأمين لتكوين البولي استرات أو البولي اميدات على التوالي كما فى
المعادلات الآتية :

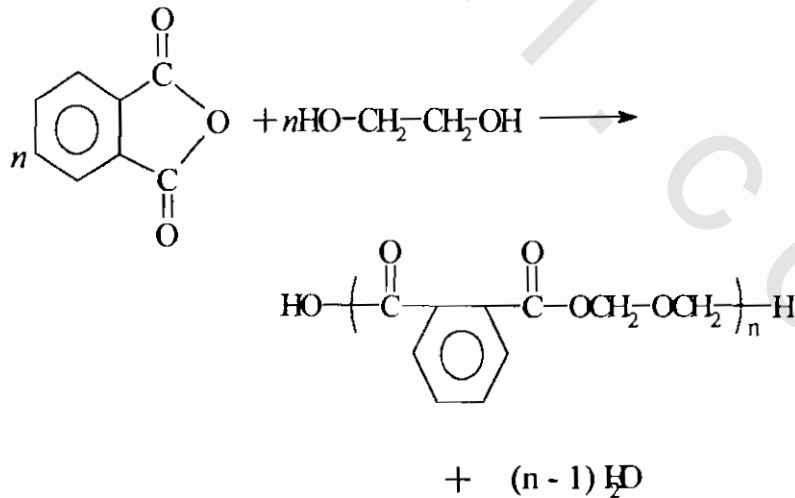


بولي (تيرفتالات الاثيلين)



نايلون 106

إن تفاعلات الأحماض مع الجلايكولات مستعملة بكثرة لغرض إنتاج
الراتنجات الالكيدية Alkyde resins . ولعل أهم هذه التفاعلات هو تفاعل
حامض الفثاليك اللامائي Phthalic anhydride مع جلايكول الاثيلين :

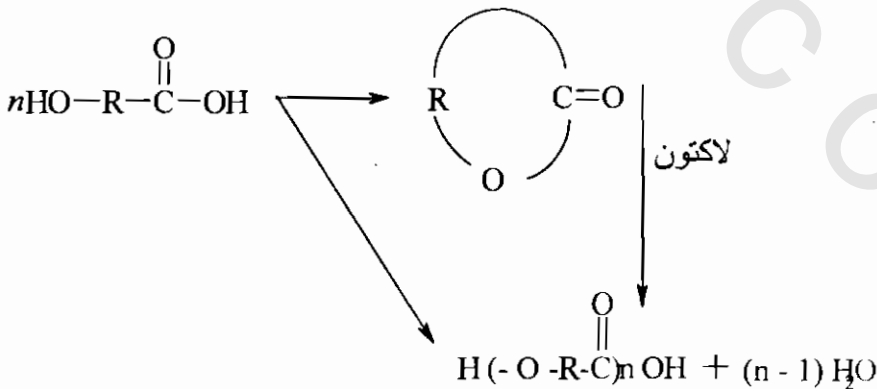
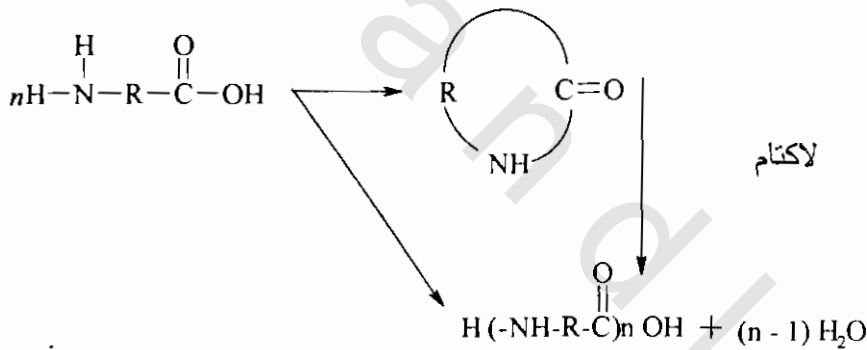


تفاعلات البلمرة التكثيفية

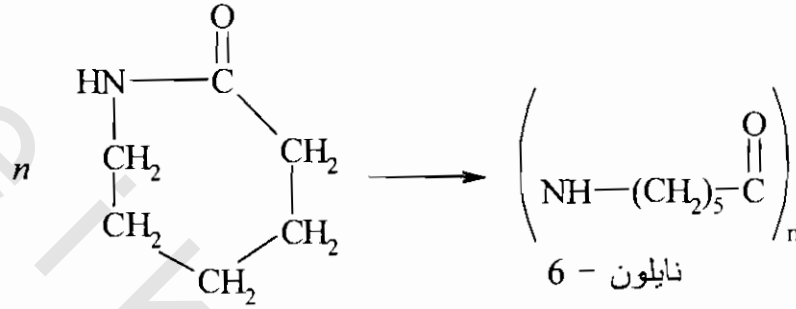
أ- تفاعلات البلمرة المتضمنة تكوين مركبات حلقة إضافية إلى السلاسل المفتوحة

Reactions involving the formation of cyclic compounds versus polymeric chains

من الأمثلة على ذلك مونوميرات الأحماض الامينية Amino acids وأحماض الهيدروكسي الكربوكسيلية Hydroxycarboxylic acids التي بإمكانها أن تكون السلاسل البوليمرية أو مشتقات الاكتام Lactam واللاكتون Lactone الحلقية على التوالي وكما هو مبين في التفاعلين الآتيين :



أما العامل الذي يحدد نوعية الناتج فهو حجم الحلقة المتكونة أى ثبات الحلقة وكذلك وظروف التفاعل . إن المركبات الحلقية المتكونة يمكن تحويلها إلى بوليمرات ذات سلاسل طويلة تحت ظروف معينة كما هو الحال عند تحضير النايلون-6 من الكايرولاكتام :



2- تفاعلات مجموعة الكربونيل المتضمنة على الإضافة ثم التعويض :

Carbonyl addition – substitution reactions

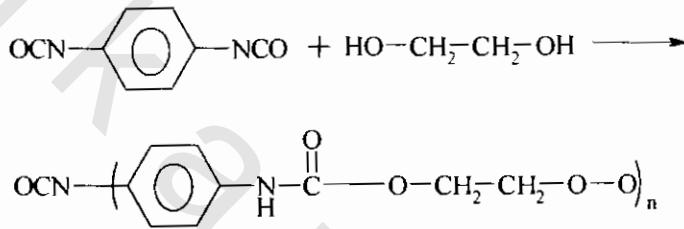
وأن أهم تفاعلات هذا الصنف من البلمرة هي تفاعلات الالديهيدات مع الكحولات ، والتي تتم بخطوتين خطوة الإضافة إلى الرابطة المزدوجة في مجموعة الكربونيل ، ثم تتبعها خطوة التعويض Substitution .

وهذا النوع من التفاعل يستخدم لتحضير بعض البوليمرات كالبولي اسيتالات وراتنجات الميلامين - فوروم الدهيد melami-formaldehyde ، وراتنجات الفينول فورمالدهيد phenol formaldehyde resin وراتنجات اليوريا فورمالدهيد Urea formaldehyde resin ويمكن توضيح خطوتي الإضافة والتعويض في المعادلات التالية لتحضير البولي استيال :

4- تفاعلات الإضافة إلى الرابطة المزدوجة

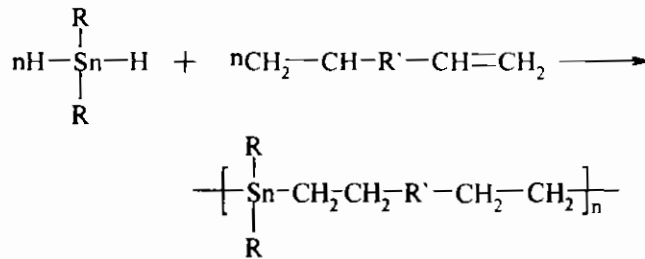
Double bond addition reactions

توجد بعض تفاعلات الإضافة إلى الرابطة المزدوجة يمكن بواسطتها تحضير بولمرات تكثفية ، وأهم أصناف هذه البوليمرات هو البولي يوريثات ، ويتميز بوجود مجموعة رابطة يوريثانية Urethane group بين الوحدات التركيبية ، ويحضر هذا البوليمر من تفاعل ثنائي ايزوسيانات Di isocyanate مع مركبات ثنائية الهيدروكسيل Dihydroxy compound كما في التفاعل الآتي :



بولي يوريثان (polyurethane)

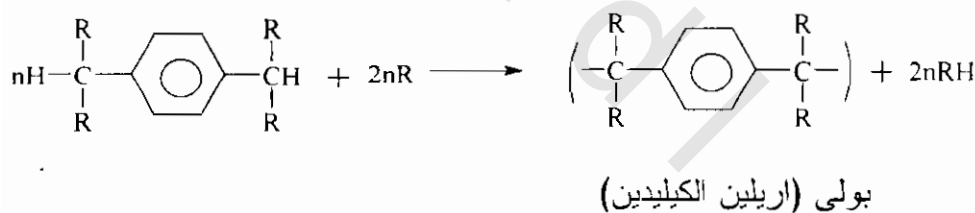
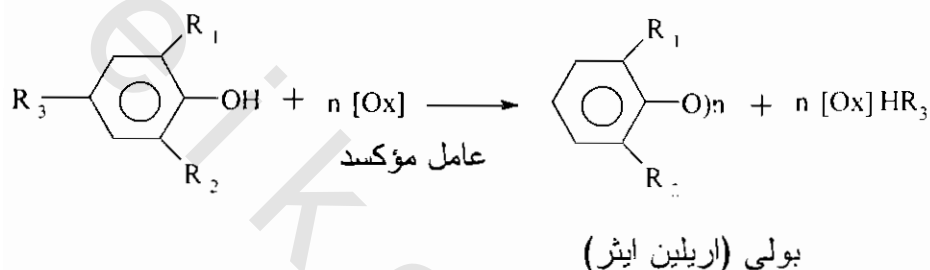
وهناك عدداً كبيراً من البوليمرات يمكن تحضيرها بواسطة هذه التفاعلات منها ، بولي يوريا وبولي ثايوكاربامات وبولي يوريلين وبولي (أوكسيد الايمين) والبوليمرات التي تعتمد على تفاعل ديلز - الدر وبعض البوليمرات العضوية الفلزية مثل تلك البوليمرات الناتجة من إضافة هيدريدات الفلزات العضوية إلى الرابطة المزدوجة :



5- التفاعلات المتضمنة على ميكانيكية ازدواج الجذور الحرة

Reactions involving free radical coupling mechanism

تستخدم تفاعلات ازدواج الجذور الحرة في تحضير عدد من البوليمرات التكتفية ولعل أهمها هي بولي (أريلين إيثر) والبوليمرات المحتوية وحدات استيلينية في تركيبها وبولي (أريلين الكليدين) وغيرها ، وتبين التفاعلات أدناه نماذج لهذه الأصناف الثلاثة من البوليمرات :

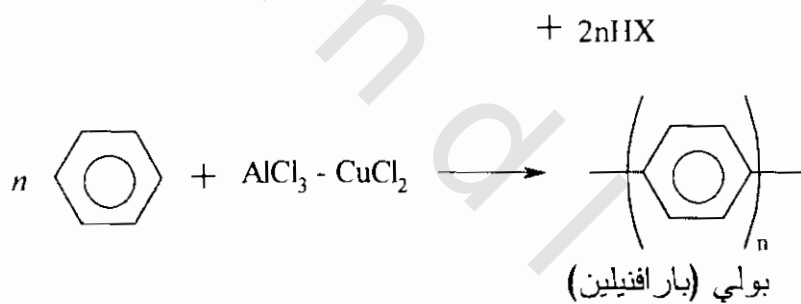
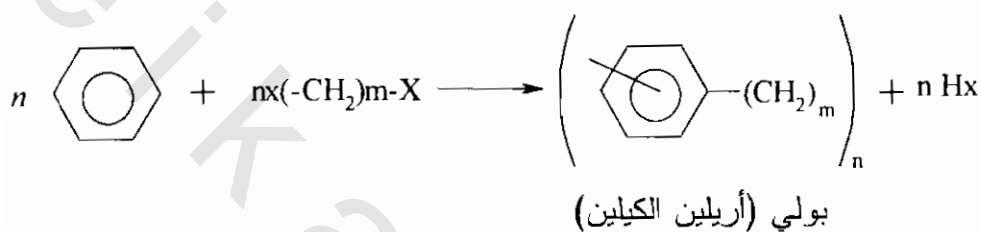
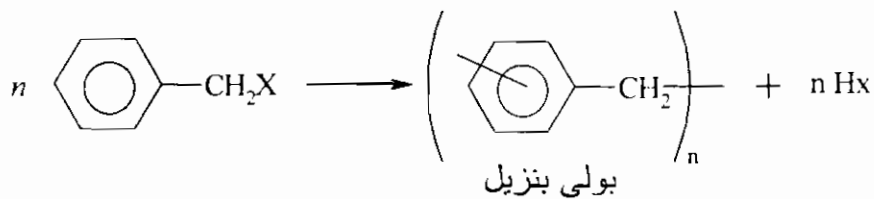


6- تفاعلات التعويض الالكتروفيلية للمركبات الاروماتية :

Aromatic electrophilic – substitution reactions

وتحضر هذه البوليمرات التكتفية باستخدام عوامل مساعدة ومن النوع المستخدم في تفاعلات فريدل – كرافت . وأهم هذه البوليمرات هي البولي

بنزيل Polybenzyl ، والبولي (أريلين الكيلين) Poly (arylene-alkylene) ، والبولي (بارافنيلين) Poly(p-phenylene) كما في التفاعلات التالية :



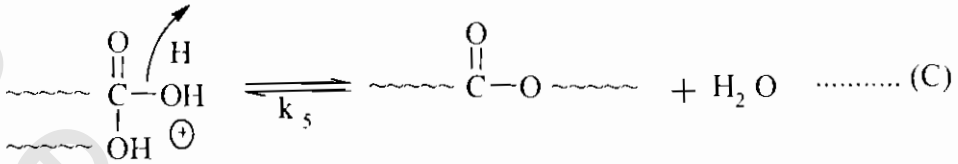
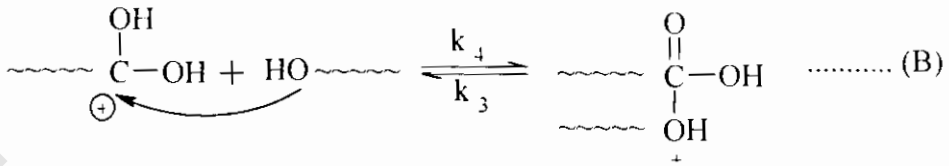
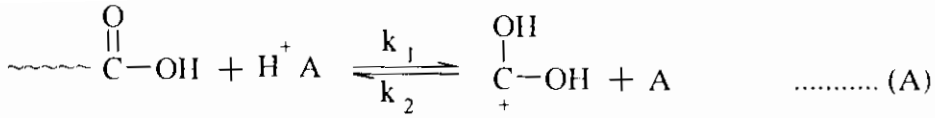
حركية البلمرة التكثيفية

Kinetics of condensation Polymerisation

يلاحظ في البلمرة التكثيفية أن المونومير يختفى منذ المراحل الأولى من التفاعل ، فعندما تصل جزئيات البوليمر إلى عشر وحدات بنائية متكررة لا تتعدى نسبة المونومير في مزيج التفاعل عن 1% . من ناحية أخرى نجد في البلمرة التكثيفية إمكانية حدوث التفاعل بين أية جزئيتين في مزيج التفاعل ، وعليه فإن سرعة تفاعل البلمرة التكثيفية تتمثل بمجموعة سرعة التفاعلات المختلفة التي تحدث بين الجزئيات المتباينة الحجم ، ولقد أثبتت التجارب العملية بعض الحقائق التي تتلخص فيما يلي:

1. إن فعالية المجموعتين الدالتين في جزئيات المونوميرات متكافئة في فعالية البلمرة إذا كانتا مفصولتين عن بعضهما بأكثر من ذرتي كربون.
2. إن فعالية أي من المجاميع الدالة لا تعتمد على طبيعة المجموعة الدالة الأخرى في الجزئية سواء كانت متفاعلة أو غير متفاعلة .
3. إن فعالية المجاميع الدالة لا تعتمد على حجم الجزئية .

ولبيان حركية البلمرة التكثيفية نأخذ تحضير البولي استرات كمثال لهذا النوع من التفاعل من المعروف بأن الاسترة البسيطة تتم عادة بوجود عوامل مساعدة حامضية حيث يتم التفاعل على خطوتين أساسيتين هما : خطوة إضافة البروتون إلى مجموعة الكربونيل في الحامض الكربوكسيلي ، وخطوة تفاعل الكحول مع مجموعة الحامض المضاف إليها البروتون ، كما هو موضح في المعادلات الآتية :



يقصد بـ (~~~~) كافة الجزيئات التي تحمل المجاميع الفعالة الدالة إن طبيعة معظم تفاعلات التكثف بشكل عام وتفاعلات الاسترة Esterfication بشكل خاص هي من التفاعلات العكسية وتنتهي بالإتزان Equilibrium ، وللحصول على بوليمر ذو وزن جزيئي عالي يستوجب أن يسير التفاعل باتجاه واحد وهو إتجاه تكوين البوليمر . لذا يجب إزالة الناتج الثانوي المتكون في تفاعل البلمرة وبذلك يستمر التفاعل نحو تكوين البوليمر ، وعند ذلك يمكننا اعتبار التفاعل غير العكسي عند دراسة حركية التفاعل في مثل هذه الظروف الخاصة .

يعبر عادة عن سرعة تفاعل البلمرة بدلالة تراكز المجاميع الدالة المتفاعلة ، ويمكن تتبع سير التفاعل عملياً وذلك بمعايرة مزيج التفاعل مع قاعدة لغرض تعيين تركيز مجاميع الكربوكسيل المتبقية بعد مرور فترات زمنية مختلفة منذ بدء البلمرة .

ولقد وجد في تفاعلات تكوين البولي استرات تعد خطوة إضافة البروتون إلى مجموعة الكربوكسيل تعد بمثابة الخطوة المحددة لسرعة تفاعل البلمرة ويمكن التعبير عن سرعة التفاعل لمرحلة التكاثر من المعادلة :

$$R_p = \frac{-d[COOH]}{dt} = k_3[C^+(OH)_2][OH] \dots \dots \dots (D)$$

حيث أن $[COOH]$ ، $[OH]$ ، $[C^+(OH)_2]$ تمثل تراكيز مجاميع الكاربوكسيل والهيدروكسيل والكاربوكسيل المتحد بيروتون على التوالي مقاسة بوحدات المول/لتر . وهذه المعادلة غير مستعملة عملياً لتعيين سرعة تفاعل البلمرة لأنه لا يمكن إيجاد تركيز $[C^+(OH)_2]$ بسهولة ، لذلك يحول إلى صيغة أكثر عملية وذلك بالتعويض عن تركيز $[C^+(OH)_2]$ في المعادلة المتوازنة (A) بما يساويها كما يلي :

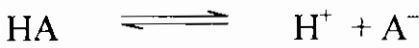
$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{[C^+(OH)_2][A^-]}{[COOH][HA]} \dots \dots \dots (F)$$

$$[C^+(OH)_2] = \frac{k_1[COOH][HA]}{k_2[A^-]} \dots \dots \dots (G)$$

وبالتعويض عن قيمة $[C^+(OH)_2]$ في المعادلة (D) نحصل على :

$$R_p = \frac{-d[COOH]}{dt} = \frac{k_1 k_3 [COOH][OH][HA]}{k_2 [A^-]} \dots \dots \dots (H)$$

يمكن التعبير عن قيمة $[A^-]$ تركيز الشق السالب للحامض من معادلة تفكك الحامض الآتية :



$$K_{HA} = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]}, [A^-] = K_{HA} \frac{[HA]}{[H^+]} \dots \dots \dots (J)$$

وبالتعويض عن قيمة $[A^-]$ تركيز الشق السالب للحامض من معادلة تفكك الحامض (J) .

نحصل على :

$$\frac{d(COOH)}{dt} = \frac{k_1 k_3 (COOH)(OH)(H^+)}{k_2 k_{HA}} \dots \dots \dots (K)$$

يبدو من المعادلتين (K, H) أن لطبيعة الحامض المستخدم تأثير كبير على سرعة البلمرة فيما إذا كان الحامض المستعمل حامضاً قوياً مثل حامض الكبريتيك الذي يستخدم كعامل مساعد خارجي أو في حالة عدم استخدام حامض كعامل مساعد خارجي كما يلي :

أولاً : حركية البلمرة في حالة عدم وجود عامل مساعد خارجي :

Kinetics of polymerization without external catalyst

في حالة عدم استخدام الحامض كعامل مساعد خارجي فإن المونومير المحتوى على مجاميع الكاربوكسيل الحامضية يمتلك بنفسه كعامل مساعد Self catalysed لتكوين البولي استرات.

وفي هذه الحالة يعوض عن تركيز (HA) بالتركيز (COOH) بالشكل التالي :

$$\frac{-d(\text{COOH})}{dt} = k(\text{COOH})_2(\text{OH}) \dots \dots \dots (A)$$

حيث أن k يمثل قيم الثوابت k_1, k_2, k_3 والتركيز {A}. ويبدو من المعادلة A أن التفاعل من دون عامل مساعد خارجي هو من الرتبة الثالثة Third order reaction أي يكون اعتماده على تركيز مجاميع الكاربوكسيل من الدرجة الثانية وكل جزيئة متفاعلة يقابلها جزيئة أخرى تسلك كعامل مساعد .

وبما أن التفاعلات التكنفية تستوجب استخدام تراكيز متكافئة من المجاميع الفعالة ، فإن تركيز [OH] يكون مساوياً لتركيز [COOH] وتصبح المعادلة (A) بالشكل الآتي :

$$R_p = \frac{-d[C]}{dt} = k[C]^2[C] = k[C]^3 \dots\dots\dots (B)$$

حيث c يمثل تركيزاً معيناً .

وبعد تكامل المعادلة (B) Intergration نحصل على :

$$2kT = \frac{1}{c^2} - X \dots\dots\dots(C)$$

حيث X ثابت التكامل و t عبارة عن فترة البلمره ، عندما يكون الزمن t = صفر ، تكون c مساوية إلى c₀ أى أن ثابت التكامل هو $\frac{1}{C_0^2} = X$ ويمكن التعبير عن المعادلة (C) نسبة للمجاميع الدالة المتفاعلة.

فلو فرضنا بأن نسبة المجاميع الدالة المتفاعلة بعد مرور الزمن (t) على البلمره = p فتكون نسبة المجاميع الفعالة غير المتفاعلة المتبقية عند الزمن t = (1 - p) أى أن تركيز الدالات غير المتفاعلة عند الزمن t والتي يمكن تعيينها بواسطة المعاييرة مثلاً يكون مساوياً :

$$c = C_0 (1 - p) \dots\dots\dots (D)$$

وبالتعويض عن قيمة c فى المعادلة (C) نحصل على :

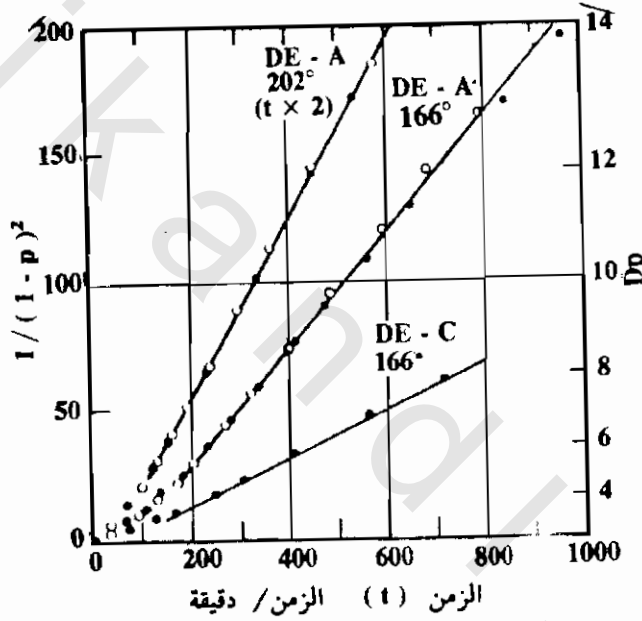
$$2c_0^2kt = \frac{1}{(1-p)^2} + X \dots\dots\dots(F)$$

إن المقدار 1/1-p يمثل النسبة بين تركيز المجاميع الفعالة الكلية فى بداية التفاعل إلى تركيز المجاميع الفعالة غير المتفاعلة وهذا يمثل مقدار مهم

جداً يدعى بدرجة البلمرة (Dp) Degree of Polymerization والذي يعبر عنه عادة بـ X^n . وبالتعويض عن قيمة $1/1-p$ فى المعادلة (F) ينتج :

$$2c_0^2kt = (Dp)^2 + X \dots\dots\dots(G)$$

أى أن درجة البلمرة تزداد طردياً مع زمن التفاعل وعند رسم العلاقة البيانية بين $1/1-p$ أو Dp وزمن البلمرة (t) نحصل على العلاقة المبينة فى الشكل التالي :



تفاعلات داي اثيلين كلايكول (DE) مع حامض الاديبيك (A) مرة ومع حامض الكاربويك (C) مرة أخرى حيث يظهر علاقة الزمن بـ Dp .

ثانياً : حركية البلمرة التكثفية فى وجود عامل مساعد خارجي :

Kinetics of externally catalysed condensation polymerization

وجد أنه عند استعمال عامل مساعد خارجي يكون تركيز [HA] و $[H^+]$ ثابتاً خلال عملية البلمرة ولذلك تصبح معادلة سرعة التفاعل كما يأتي :

$$R_p = -\frac{d[COOH]}{dt} = \frac{k_1 k_3}{k_2 k_{HA}} [COOH][OH] \dots \dots \dots (A)$$

فإذا عبرنا عن تراكيز المجاميع الدالة بـ (c) تصبح المعادلة السابقة كما يلي :

$$R_p = -\frac{dc}{dt} = k' C^2 \dots \dots \dots (B)$$

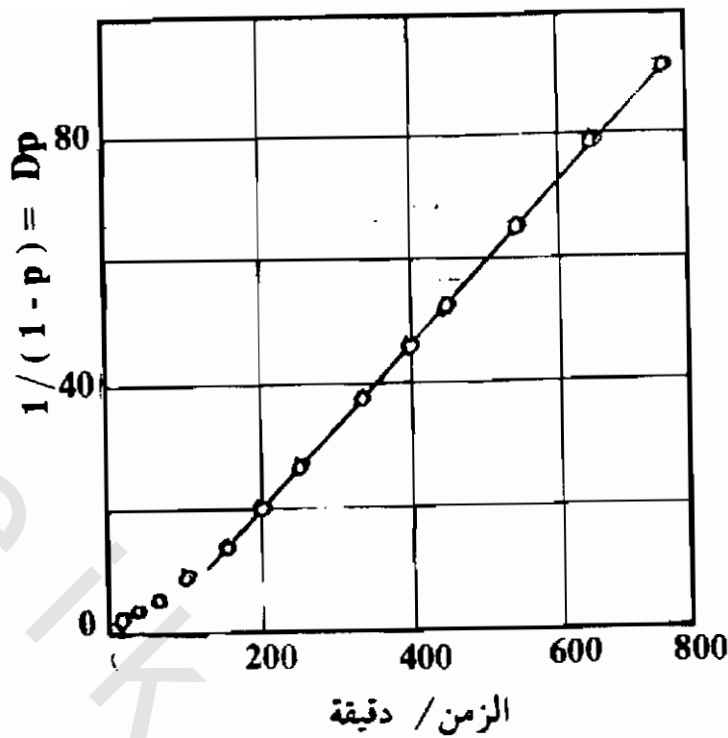
أى أن معادلة سرعة التفاعل هي من الدرجة الثانية بالنسبة لتركيز المونوميرين المستخدمين . أما إذا عبرنا عن التركيز شكل نسبي مثل نسبة المجاميع الدالة غير المتفاعلة ثم تكامل المعادلة السابقة نحصل على :

$$c_0 k' t = \frac{1}{1-p} + X \dots \dots \dots (C)$$

وبالتعويض عن قيمة $1/1-p$ والمساوية لدرجة البلمرة D_p نحصل على:

$$c_0 k' t = D_p + X \dots \dots \dots (D)$$

وعند رسم العلاقة البيانية بين درجة البلمرة D_p وزمن البلمرة (t) نحصل على العلاقة المبينة في الشكل التالي :



تغير D_p مع تغير الزمن عند بلمرة داي اثيلين كلايكول مع حامض الاديبيك بوجود كمية من باراتولوين حامض السلفونيك p-toluenesulfonic (0.4% نسبة مولية) كعامل مساعد

ويلاحظ من الشكل أن درجة البلمرة تزداد بزيادة زمن التفاعل ، إلا أن معدل الزيادة في درجة البلمرة مع الزمن تكون أكبر في حالة استخدام عامل مساعد خارجي مما هو في حالة عدم استعمال عامل مساعد .

الأسئلة

1 : بين نوع المجاميع الرابطة فى البوليمرات الآتية :

— نابلون -66

— بولي تيرفتالات الاثيلين

— راتنج الميلامين فورمالدهيد

— النشا

— راتنجات الايبوكسي

— بولي سلفون

— بولي (جلايكول الاثيلين)

— بولي يوريثان

— بولي يوريا

— بولي (اوكسيد الاثيلين)

— بولي (ثايوكاربامات) .

2 : أكتب مثلاً على تفاعلات البلمرة التكتفية المناسبة لتحضير البوليمرات

المذكورة فى السؤال الأول ؟ ما هى النواتج الثانوية المرافقة لكل تفاعل ؟

وضح أجابتك بمعادلات كيميائية .

3 : لماذا تعد البوليمرات الآتية تكتفية وليست بوليمرات إضافة ؟

— بولي يوريثان

— بولي بنزيل

— بولي كابروولاكتام

— بولي (بارا فنيلين)

— بولي (اوكسيد الاثيلين) .

4 : كيف تعلق عدم اعتماد فعالية المجاميع الدالة على حجم الجزيئة ؟

5 : وضح من الناحية الحركية تغير الوزن الجزيئي للبوليمر التكتفي مع زمن البلمرة ؟

6 : لماذا يكون معدل تغير درجة البلمرة مع الزمن أسرع في حالة استعمال عامل مساعد خارجي مما في حالة عدم استعماله ؟

7 : عند بلمرة كميات مولية متكافئة من حامض الاديبيك وهكسامثيلين داي أمين أحسب معدل درجة البلمرة \bar{D}_p عند بلوغ نسب المواد المتفاعلة : 0.5 ، 0.8 ، 0.9 ، 0.95 ، 0.98 ، 0.995 كيف تعلق قيم \bar{D}_p العالية المستحصل عليها عند نسب التحويل العالية ؟

8 : عدد الطرق التي بواسطتها يمكن السيطرة على الوزن الجزيئي للبوليمر في البلمرة التكتفية مع بيان عيوب كل طريقة .