

## فصل اول

### مقدمه

#### 1-1 پلیآمیدها

پلیآمیدها به پلیمرهای گفته می شود که شامل گروه آمیدی در زنجیره اصلی هستند و به عنوان اجزای اصلی زنجیره پلیمری به شمار می آیند. مونومرهای آمینوکاپرونیک اسید، پلیآمیدهایی از نوع AB میسازند که A نمایش دهنده گروههای آمینی و B گروههای کربوکسیلی است. اگر پلیآمیدها با تراکم دی آمین و اسیدهای دو عاملی بوجود آیند، آنها را نوع AABB می نامند. در لفظ عامه، پلی آمیدها بیشتر به نام نایلون<sup>1</sup>ها شناخته شده اند. اگرچه آن ها به طور معمول پلیمرهای تراکمی به شمار می آیند، ولی به وسیله پلیمری شدن افزایشی نیز میتوانند تشکیل شوند، این روش به ویژه برای تهیه برخی پلیآمیدهای نوع AB است که مونومرهایشان لاکتام حلقوی است، مثل  $\epsilon$ -کاپرولاکتام یا پیرولیدینون.

پلیآمیدهای خطی، محصولهای تراکمی مونومرهای دو عاملی هستند. فرمول عمومی پلیآمیدهای خطی به وسیله ساختار (1) یا در مورد خود-تراکمی یک آمینو اسید، با ساختار (2) نمایش داده شده (شکل 1-1) که R و R' زنجیرهای بین گروههای عاملی در

---

<sup>1</sup> -Nylon

واکنشگرها هستند و n درجه پلیمری شدن یا تعداد واحدهای تکراری در زنجیره پلیمر را نشان می دهد.



1

2

شکل (1-1) انواع ساختارهای پلی آمیدهای خطی

- زنجیرهای بین واحدهای عاملی در واکنشگرها ممکن است دربرگیرنده هیدروکربنهای آلیفاتیک شاخه دار، خطی، حلقه های آروماتیک یا حلقوی آلیفاتیک باشد. که ممکن است شامل هترواتمهایی مانند: اکسیژن، گوگرد و نیتروژن شوند. هنگامی که گروههای آمیدی در پلیآمیدها از هر دو انتها به حلقههای آروماتیکی وصل شوند، این پلیمرها را آرامید<sup>1</sup> مینامند که از اوایل دهه 1970 مشهور شده اند. واکنشگرهای چندعاملی مانند تریآمینها، تتراآمینها و اسیدهای سه عاملی به تشکیل شاخه، اتصال عرضی<sup>2</sup> یا پلی آمیدها میگردند [1].

این نایلون در سال 1938 برای نخستین بار ریسندگی شد و در سال 1939 تولید انبوه و تجاری این فرآورده انجام گرفت و اولین فرآوردههای نساجی بدست آمده در سال 1940 به بازار عرضه شد و در طول جنگ جهانی دوم به اوج مصرف خود در صنایع نظامی رسید. افزون بر آن، نایلون در صنایع فرش و نخ های صنعتی و تقویت کنندههای لاستیک و صنایع پوشاک استفاده شد.

<sup>1</sup> -Aramid

<sup>2</sup> -Cross-linking

جدول (1-1) میزان مصرف نایلونهای بافته نشده در صنایع .

میزان تقاضای جهانی برای انواع متفاوت الیاف سنتزی بافته نشده از سال 1998 تا 2007						
2007	2005	2001	2000	1999	1998	
23/0	23/0	23/0	22/5	22/5	24/0	الیاف پلی استری
1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	الیاف پلی آمیدی
3/0	3/0	3/0	2/0	2/0	1/5	الیاف اکریلیک
62/7	62/7	62/7	63/0	63/0	62/0	الیاف پلی پروپیلن
7/0	7/0	8/0	8/0	8/0	8/0	الیاف ویسکوز ریون
2/8	2/8	2/8	3/0	3/0	3/0	الیاف سنتزی دیگر
4/0	3/7	2/5	3/3	2/6	2/4	مصرف کلی بر حسب میلیون تن

جدول (2-1): میزان مصرف نایلونهای بافته نشده و بافته شده در صنایع

میزان تقاضای جهانی برای انواع متفاوت فیبرهای سنتزی		
بافته نشده	بافته شده	
24/0	51/0	الیاف پلی استری
1/5	14/0	الیاف پلی آمیدی
1/5	8/5	الیاف اکریلیک
62/0	13/5	الیاف پلی پروپیلن
8/0	7/8	الیاف ویسکوز رایون
-	2/7	الیاف سلولزی
3/0	2/5	الیاف سنتزی دیگر
2/4	34/0	مصرف کلی بر حسب میلیون تن

## 2-1 انواع کاربردهای عمومی پلیآمیدها

### 1-2-1 کاربردهای مکانیکی

چرخ دندهها، یاتاقانها، نوردها، دندانههای چرخ دنده و پیچهای ماشین غلطک زنی.  
کالاهای مصرفی پرکاربرد: بدنههای ابزارها چرخهای دوچرخه کابلهای نسوز برس و شانههای مو.

### 1-2-2 اتومکانیکی

فنهای لوله های دستگاه سوخت رسان، فیلتر روغنها، یاتاقانها، پینیون دورسنج موتور، سرعتسنج شناور، چرخ دندههای برفپاککن شیشه اتومبیل ومخزنهای خنککن.

### 1-2-3 الکتریکی

ماشین طنابسازی چندلا تاب، جعبههای تقسیم دربرقهای فشارقوی، کابلهای جاروبرقی، چراغهای دستی وکابلهای مقاوم در برابر سایش.

### 1-2-4 متفرقه

زیپلباس، الیاف، لولههای فشارقوی درتلمبه خانها، وسایل، لوازم واسباب واثاثیه منزل ، ابزارهای پزشکی وآزمایشگاهی.

### 1-2-5 کاربردهای جدید

رزینهای پلیآمیدی دارای یک توازن بین خواص فیزیکی، مقاومت شیمیایی، کشش و ثبات خوب، سطح ظاهری خوب ومقاومت سایش بالا هستند. این مواد کاربردهایی در وسایل پزشکی شامل چاقوهای تیز، گیره وانبرکها ونیز وسایل ایجاد شوک - های مکانیکی و دینامیکی دارند.  
یکی دیگر از کاربردهای جدید و رو به پیشرفت پلی آمیدها استفاده به عنوان پوششهای پودری است که با این کار نیاز به استفاده از رنگهای محلول که محیط را آلوده میکنند از بین میرود.

در این فرآیند پودر تمیز، خشک و باردارشده بر روی سطح مورد نظر که دارای بار مخالف است، پاشیده میشوند و سپس سطح پوششدارشده در دمای بالا خشک میشود. مهمترین مزیت این روش این است که نیاز به سیستم رنگآمیزی محلول از بین میرود. در روش محلول حجم بالای حلال مورد نیاز است که این حلال درنهایت وارد هوا میشود که باعث ایجادخطرات زیستی میشود. از دیگر مزایای این روش کم شدن هزینهها، آزادی درنحوه طراحی ونیز کنترل بالا درکیفیت و عمق رنگ است [2].

## 3-1 روشهای تهیه پلیآمیدها

گرچه پلیآمیدها با روشهای متنوعی تهیه شدهاند، اما روشهای پلیمری شدن تراکمی ذوبی، پلیمری شدن حلقه گشایی و پلیمری شدن در محلول با دمای پایین (بهطور معمول برای آرامیدها) اهمیت تجاری یافته است.

### 1-3-1 آمیدی کردن مستقیم

در این روش یک آمین با یک کربوکسیل اسید واکنش میدهد و یک مولکول آب حذف میشود. گروههای واکنش دهنده ممکن است روی یک تک مولکول قرار بگیرند، مثل یک آمینواسید، یا در مولکولهای متفاوت باشند، یعنی دی‌آمین و دیکربوکسیلیک اسید باشد [3].

### 1-3-2 روش استفاده از دی‌اسید کلریدها و واکنش مستقیم با دی‌آمینها

این روش، روش مناسب برای تهیه پلی‌آمیدهای آروماتیک است. این واکنش به طور کلی به دو روش زیر قابل انجام است:

#### 1-2-3-1 پلیمری شدن بین سطحی<sup>1</sup>

بسیاری از پلیمرهایی که به وسیله واکنشهای معمول، در دمای بالا تولید میشوند را میتوان با استفاده از واکنشهای سریعتر شاتن-بومن<sup>2</sup>، از اسید کلریدها در دماهای پایینتر تهیه کرد. از اینرو پلی‌آمیدها را میتوان با جایگزین کردن واکنشگرهای دی‌اسید با دی‌اسیل کلریدهای مربوطه تهیه کرد [4].

#### 1-1-2-3-1 شرح فرآیند

ثابتهای سرعت برای این نوع واکنشها، چندین مرتبه بزرگتر از ثابتهای سرعت واکنشهای مشابه، از واکنشگرهای دی‌اسید میباشد. پلیمری شدن بین سطحی، یک روش جدید پلیمری شدن در دمای پایین است که در آن از واکنشگرهای دی‌اسیل کلرید استفاده میشود و به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور معمول، گستره دمایی بکارگرفته شده، 0 تا 50 درجه سانتیگراد میباشد. پلیمری شدن دو واکنشگر، در سطح مشترک دو فاز مایع، که هر کدام حاوی یکی از واکنشگرها است، انجام میشود (شکل 1-2).

پلیمری شدن آمیدها در دمای اتاق و با قراردادن یک محلول آبی از دی‌آمین بر روی یک فاز آلی حاوی اسید کلرید انجام میشود. واکنشگرها به سطح مشترک نفوذ مینمایند و پلیمری شدن در آنجا رخ میدهد. فرآورده پلیمری، رسوب می‌کند و اگر استحکام مکانیکی<sup>3</sup> کافی داشته باشد، میتوان آن را به صورت یک رشته<sup>4</sup> یا فیلم<sup>5</sup> پیوسته از سطح مشترک بین دو فاز بیرون کشید. پلیمرهایی که از نظر مکانیکی ضعیف هستند و نمیتوان آنها را به صورت ذکر شده خارج کرد، با باقی ماندن در محل، از انتقال واکنشگرها به سایت واکنش

<sup>1</sup> -Interfacial polymerization

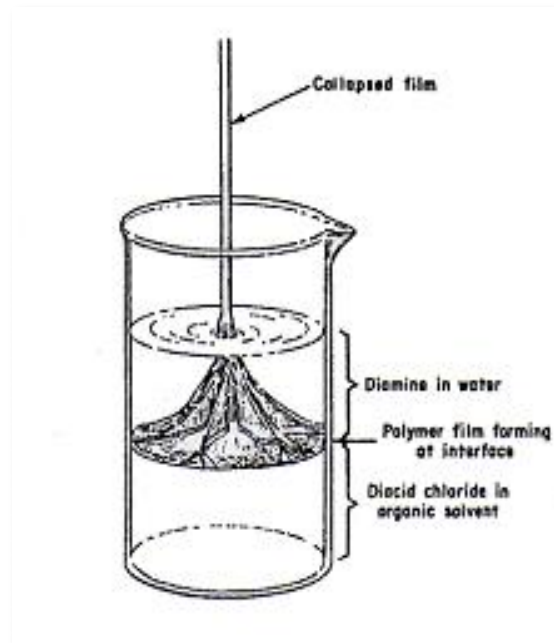
<sup>2</sup> -Schotten-Baumann

<sup>3</sup> -Mechanical strength

<sup>4</sup> -Filament

<sup>5</sup> -Film

جلوگیری مینمایند و سرعت پلیمری شدن را باگذشت زمان کاهش میدهند.



شکل (2-1) پلیمری شدن بین سطحی، خارج کردن فیلم پلیمری از سطح مشترک

سرعت پلیمر شدن به طور معمول به وسیله نفوذ<sup>1</sup> کنترل میشود، به این دلیل که سرعت نفوذ واکنشگرها به سطح مشترک کندتر از سرعت واکنش بین دو گروه عاملی میباشد. پلیمری شدن بین سطحی از نظر مکانیسمی متمایز از پلیمری شدن مرحله ای عادی میباشد، از این نظر که مونومرهای نفوذ کرده به سطح مشترک، فقط با انتهای زنجیره پلیمری واکنش خواهند داد. سرعت واکنشها بسیار زیاد است، زیرا مونومرهای دی اسید کلرید و دیآمین قبل از آن که بتوانند از میان غشاء پلیمری به سطح مشترک نفوذ نمایند و زنجیرههای جدیدی را رشد دهند، با انتهای زنجیره پلیمری در حال رشد واکنش می دهند، که این امر باعث بوجود آمدن یک تمایل شدید در فرآیند بین سطحی به تولید پلیمرهای با وزن مولکولی بالاتر در مقایسه با فرآیندهای معمول میشود. همچنین، پلیمری شدن بین سطحی نیازی به رعایت استوکیومتری بین واکنشگرها در دو فاز ندارد.

استوکیومتری خودبه خود در سطح مشترک، یعنی جایی که پلیمری شدن پیشرفت میکند، وجود دارد. همیشه یک منبع از هردو واکنشگر به دلیل نفوذ از فازهای آلی و آبی به سطح مشترک وجود دارد. افزون بر آن، پلیمر با وزن مولکولی بالا صرف نظر از درصد تبدیل کل بر پایه مقادیر حجمی دو

<sup>1</sup> -Diffusion

واکنشگر در سطح مشترک تشکیل میشود. درصد تبدیل کل را می توان با بکارگیری یک سیستم همزن به عنوان وسیلهای برای ازدیاد ناحیه سطح مشترک واکنش، افزایش داد. برای پیشرفت موفقیتآمیز پلیمری شدن بین سطحی، باید چندین پارامتر واکنش را کنترل کرد. یک باز معدنی در فاز آبی خنثی کردن فرآورده جانبی هیدروژن کلرید حضور داشته باشد. اگر هیدروژن کلرید خنثی نشده باشد، با مهاردی آمین و تشکیل نمک واکنش ناپذیر آمین هیدروکلرید سرعت واکنش را به مقدار زیادی کاهش میدهد.

در سرعتهای پایین پلیمری شدن، یا در غلظتهای بالای باز معدنی، اسید کلرید میتواند به اسید واکنش ناپذیر هیدرولیز شود. هیدرولیز نه تنها سرعت پلیمری شدن را کاهش میدهد، بلکه وزن مولکولی پلیمر را نیز به طور زیادی محدود میکند. زیرا دی اسید کلرید را به دی اسیدی که در دماهای بکار گرفته شده در پلیمری شدن بین سطحی واکنش ناپذیر نیست، تبدیل میکند.

هرچه سرعت پلیمری شدن آهستهتر باشد، مشکل هیدرولیز را بیشتر میکند. زیرا، اسید کلرید زمان بیشتری را برای نفوذ از میان سطح مشترک به داخل لایه آبی خواهد داشت. بنابراین، هیدرولیز اسیدی، استفاده از روش بین سطحی برای سنتز پلیآمیدها از دیالها را محدود میسازد. زیرا واکنش به نسبت آهسته است.  $(k \approx 10^{-3} \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1})$  واکنش دی اسید کلریدها با دی آمینها بسیار سریع میباشد.  $(k \approx 10^4 - 10^5 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1})$  که به همین علت، هیدرولیز به طور معمول مشاهده نمیشود. انتخاب حلال آلی در کنترل وزن مولکولی پلیمر بسیار حائز اهمیت است چراکه به نظر میرسد پلیمری شدن در بیشتر سیستمها در حقیقت در وجه حلال آلی سطح مشترک رخ میدهد. دلیل این امر تمایل بیشتر دی آمین به نفوذ به درون حلال آلی در مقایسه با نفوذ دی اسید کلرید به داخل وجه آبی سطح مشترک میباشد. برای بعضی سیستمها مانند، واکنش نمک دیسیدیم از یک دیهیدروفنول با یک دی اسید کلرید، عکس قضیه صادق است و پلیمری شدن در وجه آبی سطح مشترک اتفاق میافتد. حلال آلی مطلوب است که پلیمر با وزن مولکولی بالا را رسوب دهد و نه اجزاء با جرم مولکولی پایین را. رسوبدهی پیش از موعد پلیمر، از تولید فرآورده با وزن مولکولی بالای مورد انتظار جلوگیری میکند. بنابراین برای مثال زایلن، و تتراکلرید کربن رسوب دهندهایی برای تمام وزنهاى مولکولى پلی (هگزامتیلن سباسات)<sup>1</sup> هستند، درحالی که کلروفرم یک رسوب دهنده فقط برای پلیمری با وزن مولکولی بالا میباشد. پلیمری شدن بین سطحی با حلالهای آلی قبلی (زایلن و تتراکلرید کربن) فقط پلیمر با وزن مولکولی پایین را بدست میدهد. به طور معمول توزیع وزنهاى مولکولى مشاهده شده در

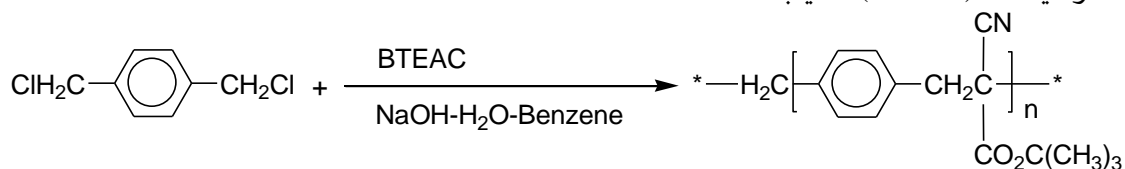
<sup>1</sup> -Poly(hexamethylene sebacate)

پلیمری شدنهای بین سطحی، متفاوت از محتمل ترین توزیع میباشد. اغلب، پلیمری شدنهای بین سطحی، توزیعیایی وسیعتر از محتملترین توزیع را سبب میشوند. اما توزیعیهای محدودتر نیز مشاهده شده است. تفاوتها احتمالا به سبب جذبجذب شدن، هنگام رسوب دهی پلیمر میباشد. این اثرتابع حلال آلی استفاده شده و ویژگیهای انحلال پذیری پلیمر میباشد. حلال آلی همچنین میتواند با تغییر ویژگیهای نفوذ، سیستم واکنش پلیمری شدن را تحت تاثیر قرار دهد. حلالی که پلیمر رسوب کرده را متورم میکند، برای افزایش نفوذ واکنشگرها از میان رسوب متورم شده به محل انجام واکنش مطلوب میباشد. به هرحال، متورم شدن نباید استحکام مکانیکی پلیمر را، از آن مقداری که اجازه خارج کردن پیوسته آنرا از سطح مشترک می دهد کمتر کند. مشخص شده است که نسبت مولی مناسب از دو واکنشگر برحسب بدست آمدن بالاترین وزن مولکولی ویا بالاترین بازده، همیشه (1:1) نمیباشد و اغلب بسته به نوع حلال آلی تغییر میکند. تمایل کمتر واکنشگر محلول در آب به نفوذ در فاز آلی، غلظت بالاتری از آنرا نسبت به دیگر واکنشگرها طلب میکند. نسبت بهینه غلظتهای دو واکنشگر نسبتی است که منجر به برابری تقریبی سرعتهای نفوذ دو واکنشگر به سطح مشترک میشود [5].

### 3-1-2-2 کاتالیزورهای انتقال فاز<sup>1</sup> (PTC)

کاتالیزورهای انتقال فاز، اگرچه به طور معمول در سنتزهای آلی بکار برده میشود. اما کاربرد بسیار محدودی در واکنشهای پلیمری شدن دارند. در معمول ترین شکل آن، روش PTC شامل یک فاز آبی و یک فاز آلی است که هر یک شامل یکی از مونومرها میباشد. در واقع این نیز یک روش بین سطحی است. کاتالیزگر اغلب یک نمک آمونیوم نوع چهارم است که یک مونومر هسته دوست را از فاز آبی به فاز آلی انتقال میدهد، جاییکه قدرت هسته دوستی به طور قابل ملاحظه ای به دلیل کاهش اثرات حلال پوشی افزایش یافته است.

یک مثال تهیه زنجیره پلیمری غیر معمولی از کربن به وسیله واکنش بین  $\alpha, \alpha'$ -دیكلرو-پارا-زایلن و ترشیو- بوتیل سیانوآستات با استفاده از کاتالیزگر بنزیل تریآمونیوم کلراید<sup>2</sup> (BTEAC) میباشد.



شکل (3-1) پلیمری شدن با روش بین سطحی

<sup>1</sup> -Phase-transfer catalysis

<sup>2</sup> -Benzyl triammonium chloride



در این حالت، آنیون بدست آمده از ترسیو-بوتیل سیانوآستات به وسیله واکنش با سدیم هیدروکسید به صورت محلول نمک بنزیل تریاتیل آمونیوم به محلول بنزن انتقال مییابد، درجائیکه به سرعت با  $\alpha, \alpha'$ -دیكلرو-پارا-زایلن از طریق یک جابهجایی هسته دوستی واکنش میدهد و پلیمر به خاطر وجود دو هیدروژن فعال ترشیو-بوتیل سیانوآستات، تشکیل میشود [6].

### 3-1-2-3-1 کاروری

- روش بین سطحی مزایای متعددی دارد:
- رعایت استوکیومتری برای تولید پلیمرهای با وزن مولکولی بالا نیاز نمیباشد.
  - واکنشها سریعتر انجام میشوند.
  - دماهای پایین اجازه سنتز پلیمرهایی را میدهد، که در دماهای بالای مورد نیاز برای پلیمری شدن تراکمی نوعی، ناپایدار هستند.
- روش بین سطحی در بسیاری از پلیمری شدنها بکار گرفته شده است، که شامل تشکیل پلی آمیدها، پلی یورتانها، پلی سولفونامیدها، پلیکربنات ها و پلیاورهها میباشد. به هرحال، این فرآیند معایبی نیز دارد که کاربرد تجاری آن را محدود ساخته است. موارد زیر از جمله این معایب می باشند:
- هزینه بالای واکنشگرهای اسید کلرید.
  - میزان زیاد حلالهایی که باید استفاده شده و بازیابی شوند.
  - کاربرد تجاری به برخی پلی کربناتها، پلی سولفیدهای آلیفاتیک و پلیآمیدهای آروماتیک محدود شده است [7].

### 3-1-2-2 کاروری

- فرآیند مناسبتر برای تهیه پلیآمیدهای آروماتیک از طریق پلیمری شدن تراکمی دمای پایین دی اسید کلریدها و دیآمینها در حلالهای آمیدی حاصل میشود که روش راحتتر و مناسبتری نسبت به روش پلیمری شدن تراکمی بین سطحی است [8].
- امتیاز دیگر این روش به روش بین سطحی از ویژگیهای انحلال پذیری پلی آمیدهای آروماتیک معینی به دست میآید. اگرچه، این پلیمرها که باروش پلیمری شدن تراکمی دردمای پایین درمحلول تهیه میشوند، انحلال پذیر هستند، اما اغلب آنها را نمیتوان دوباره درحلالها حل کرد (به غیر از اسیدهای قوی مثل اسید سولفوریک). بنابراین پلیمری شدن بین سطحی منجر به تهیه محصولی میشود که به صورت رسوب است و به راحتی از محلول قابل فراورش نیست.

در روش پلیمری شدن تراکمی در محلول، محیط پلیمری شدن، حلالی خنثی برای حداقل یکی از واکنشگرها و حلال یا عامل تورمزا برای پلیمر بشمار میآید که البته اگر حلال باشد بهتر است. حلال باید نسبت به واکنشگرها خنثی یا تا حدود زیادی خنثی باشد. جاذب اسید نیز که معمولاً "یک آمین نوع سوم است اضافه میشود، مگر اینکه خود حلال به صورت یک جاذب عمل کند.

آمیدهایی مانند: دی متیل استامید<sup>1</sup> (DMAC)، -N- متیل پیرولیدینون<sup>2</sup> (NMP)، هگزامتیل فسفوریک تری آمید<sup>3</sup> (HPT) و تترامتیل اوره<sup>4</sup> (TMU) حلالهای مناسبی هستند. دوحلال DMF و DMSO چون با اسیدکلریدها واکنش میدهند، نمیتوانند مورد استفاده قرار بگیرند.

در پلیمری شدن محلول پلیآمیدهای آروماتیک، با افزایش وزن مولکولی پلیمر هیچ حلال آلی قدرت محلول نگهداشتن پلیمر را ندارد. قدرت حلالیت بسیاری از حلالهای آلی با افزایش لیتیم یا کلسیم کلرید به شدت افزایش مییابد. بسیاری از پلیمرهای با وزن مولکولی بالا را میتوان با حلالهای حاوی نمک تهیه کرد.

حلالهای آمیدی مانند DMAC با کمی هیدروکلرید مربوطه حلالهای بسیار بهتری از آمیدهای خالص هستند. حلال آمیدی با اضافه شدن هیدروژن کلرید تولید شده از تراکم دیآمینهای آروماتیک با دیاسید کلریدها، ترکیب حلال-نمک مطلوبی را ایجاد میکند. افزون بر آن غلظت نمک هیدروژن کلرید با پیشرفت واکنش پلیمری شدن تراکمی افزایش مییابد، در نتیجه، قدرت حلالیت حلال با افزایش وزن مولکولی پلیمر افزایش مییابد.

بعضی از پلیآمیدهای آروماتیک میلهايشکل میتوانند در نسبتهای معینی از مخلوط در حلال، بالاترین وزن مولکولی را ایجاد کنند.

گاهی افزایش نمک به مخلوط بعضی حلالها منجر به تشکیل پلیمری با وزن مولکولی پایین میشود، زیرا نمک با هریک از حلالها کمپلکس ویژه ای میدهد که در نتیجه کمپلکس بین جفتهای حلال از بین میرود.

### 3-3-1 پلیمری شدن از طریق پلی فسفردار کردن<sup>5</sup>

آمیدی کردن در یک حلال مانند NMP به وسیله تریفنیل فسفیت و پیریدین به عنوان باز صورت میپذیرد (شکل 1-4).

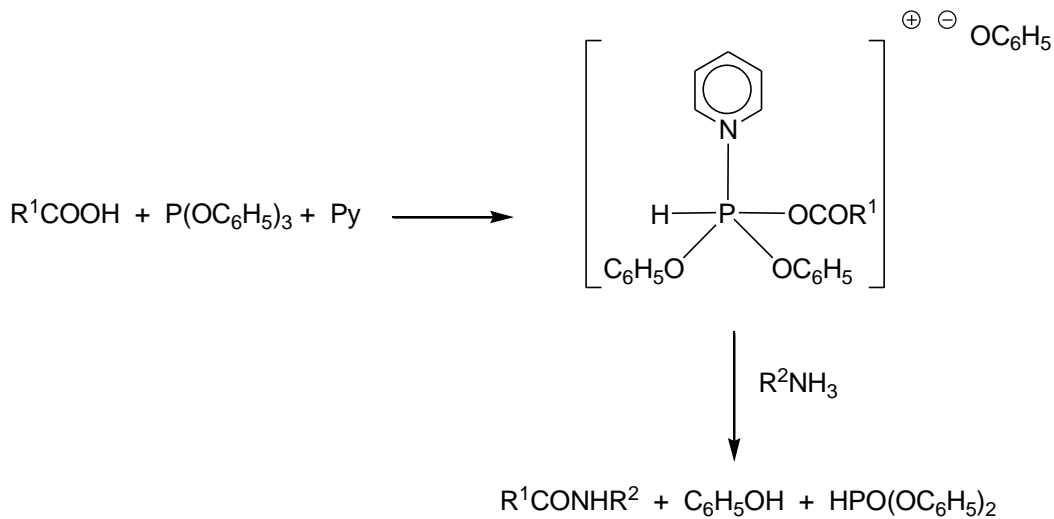
<sup>1</sup> -N,N-Dimethylacetamide

<sup>2</sup> -N-Methyl-2-Pyrrolidone

<sup>3</sup> -Hexamethyl phosphoric triamide

<sup>4</sup> -Tetramethyl urea

<sup>5</sup> -Phosphorylation polymerization



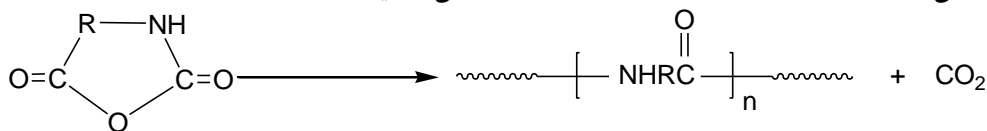
شکل (4-1) پلیمری شدن از طریق پلی فسفردار کردن

در این روش از واکنش تریفنیل فسفیت، کربوکسیلک اسید و پیریدین نمک -N فسفونیوم پیریدین تولید میشود و سپس با دیآمین وارد واکنش میشود و تولید اتصال آمیدی مینماید [9]. بهترین روش کار در مقیاس آزمایشگاهی توسط یا مازاکی و همکارانش ارائه شده است [10]. در این پژوهش روش کار بر اساس روش یا مازاکی<sup>1</sup> میباشد که در قسمت عملی بهطور کامل توضیح داده خواهد شد. همچنین، میتوان فعالسازی را با ترکیب ترینیترو کلرید انجام داد.

### 4-3-1 پلیمری شدن حلقه‌گشایی

این روش یکی از مهمترین روشهای تجاری تهیه پلیمرهایی با جرم مولکولی بالا از لاکتامهای حلقوی مانند -ε-کاپرولاکتام است. پلیمری شدن بدون حذف یک محصول جانبی اتفاق میافتد.

پلیمری شدن حلقه گشای N-کربوکسی انیدریدها با حذف کربن دیاکسید (شکل 5-1) در تهیه پلی-α-آمینو اسیدهایی با وزن مولکولی بالا مورد استفاد قرار می گیرد [11].



شکل (5-1) پلیمری شدن حلقه‌گشایی

<sup>1</sup> -Yamazaki

### 1-3-5 سایر روشهای تهیه پلیآمیدها

- افزایش آمینها به پیوندهای دوگانه فعال شده [12].
- پلیمری شدن ایزوسیاناتها [13].
- واکنش فرمالدهید بادی نیتریل ها [14].

### 1-4 روش های متداول شناسایی پلی آمید ها

#### 1-4-1 تجزیه گرمایی<sup>1</sup>

مهمترین ونهایتترین شاخص در مطالعه پلیمرهای پایدار گرمایی، اندازه گیری و سنجش پایداری گرمایی است. چندین روش در این مورد وجود دارد، ولی هیچگاه دو روش نمیتوانند بهطور مستقیم در همه حالتها مقایسه شوند. هدف نشان دادن تغییرات یک سری خواص فیزیکی نسبت به دما میباشد. غیر قابل اعتماد بودن اندازه گیریها به دو علت است:

- پیچیدگی تغییرات ساختاری پلیمر در اثر تخریب.
- اثر این تجزیه و زوال روی خواص پلیمر مورد سنجش.

مسئله دیگر، محیط تجزیه است. باید به باقی ماندن فرآوردههای گازی بدست آمده از تجزیه توجه شود، یعنی دقت شود که آیا گازی در اطراف نمونه تولید میشود یا نه، و اگر تولید میشود با چه سرعتی. اگر اتمسفر اطراف نمونه ایستا است، این مورد چه اثری بر روی فرآوردههای ناشی از تجزیه و زوال بیشتر نمونه دارد. در دماهای بالا، بین محیط گازی و پلیمر میتواند واکنشهایی صورت گیرد. در محیطهای خنثی مانند نیتروژن، هلیوم یا آرگون میزان افت خواص نسبت به محیط کمتر است و در دماهای بالاتر این افت خواص اتفاق میافتد. در غیاب هوا، حتی در دماهای بسیار بالا نیز افت خواص 100 درصد نیست. علت این امر باقی ماندن و شکل گیری یک ماده شبه گرافیتی است. در هوا و در دماهای بالا، پلیمر اکسید میشود و این اکسایش و شکست پیوندها باعث تولید فرآوردههای گازی میشود و افت وزنی 100 درصد ایجاد میکند. به طور معمول، از کاهش وزن برای سنجش پایداری استفاده میشود. تغییرات وزن در برابر افزایش دما، و یا در برابر افزایش زمان در دمای ثابت ثبت میگردد. تجزیه پلیمرها در اثر عواملی که اغلب ناشناخته هستند، مانند گروههای انتهایی، ناخالصیها، حلال باقی مانده و غیره تاثیر میپذیرد. با توجه به مواردی که در بالا گفته شد، لزوم دانستن معانی، مزایا و نقصهای هر یک از نتایجی که از آزمون های گوناگون بهدست میآید، انکار ناپذیر است [15].

دمای انتقال شیشه<sup>2</sup>، اغلب به وسیله دستگاه گرماسنج پویشی تفاضلی<sup>3</sup> (DSC)، دستگاه تجزیه گرمایی تفاضلی<sup>1</sup> (DTA) و

<sup>1</sup> -Thermal analysis

<sup>2</sup> -Glass transition tempertuer

<sup>3</sup> -Differential scanning calorimeter

یا تجزیه ترمومکانیکی<sup>2</sup> (TMA) اندازه گیری میشود. تخریب گرمایی به وسیله تجزیه گرما وزنی<sup>3</sup> (TGA) و کروماتوگرافی گاز-پیرولیز<sup>4</sup> (PGC) تعیین میشود. نوع اخیر، اغلب همراه با اسپکتروسکوپی جرمی بکارگرفته میشود. برای اندازه گیری قابلیت اشتعال، انواع متفاوتی از روشهای استاندارد در مقیاس کوچک آزمایشگاهی و مقیاس بزرگ بهکار گرفته شدهاند. انواع این تکنیکها در زیر توضیح داده است [16].

#### 1-1-4-1 روشهای تجزیه گرمایی

- تکنیکها و دستگاههای بسیاری برای تجزیه گرمایی وجود دارند. موارد زیر بیشترین کاربرد را در شناسایی پلی آمیدها دارا میباشند [15].
- گرماسنجی پویشیتفاضلی (DSC) و تجزیه زمانی گرمایی تفاضلی (DTA): روشی برای تعیین  $T_m$  و  $T_g$
- تجزیه گرما-وزنی (TGA).
- تجزیه ترمومکانیکی (TMA): اندازگیری پاسخ مکانیکی (نفوذ در فشار ثابت) با تغییرات دما.
- تجزیه گازهای تشکیل شده و یا آزاد شده: کنترل نمودن فرآوردههای گازیشکل بهدست آمده از فرآیند تجزیه اکسایشی یا گرمایی.

#### 2-1-4-1 گرماسنج پویشیتفاضلی (DSC) و تجزیه زمانی گرمایی تفاضلی (DTA)

- DTA روشی بسیار قدیمی است، پیشینه آن به زمان لوشاتولیه<sup>5</sup> در قرن پیش برمیگردد. اما تا سال 1960 برای پلیمرها بهکار برده نشده بود. DSC، جدیدتر از روش کلاسیک قدیمی است و به عنوان روشی مناسب برای مطالعه کمی تحولات گرمایی در پلیمرها انتخاب شده است. در هر دو روش DSC و DTA، یک نمونه پلیمر و یک مرجع بیاتر در جو نیتروژن گرم میشوند و تحولات گرمایی در نمونه اندازهگیری می شود. برای ظرف نمونه، اغلب از یک فنجان<sup>6</sup> خیلی کوچک آلومینیومی استفاده میشود (برای تجزیههای بالاتر از 800 درجه سانتیگراد از طلا یا گرافیت استفاده میشود) و مرجع، یک فنجان خالی یا یک فنجان شامل یک ماده بی اثر در محدوده دمایی مورد نیاز مانند آلومینای بدون آب می باشد. مقدار نمونه از حدود 0/5 تا 10 میلیگرم تغییر می کند. با وجود تفاوتهاى عمدهای که این دو روش در ابزار کار با یکدیگر دارند اما نتایج یکسانی میدهند. با روش

<sup>1</sup> -Differential thermal analysis

<sup>2</sup> -Thermomechanical analysis

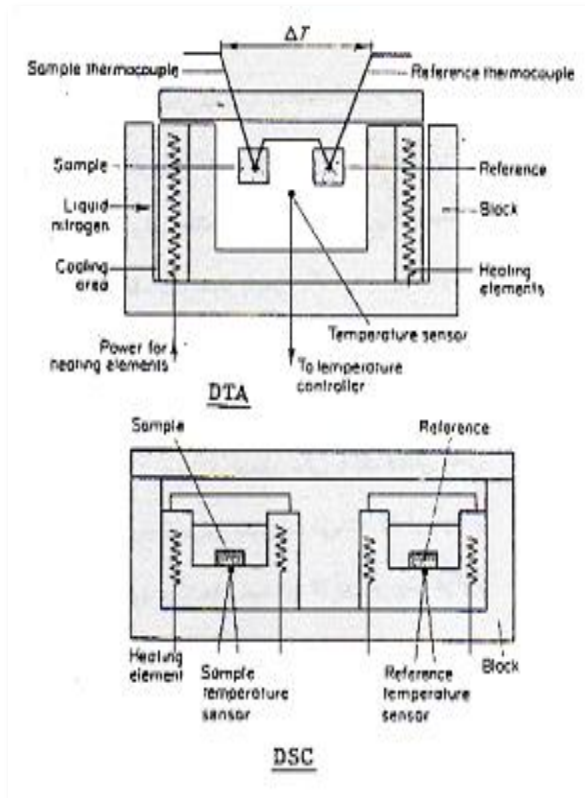
<sup>3</sup> -Thermogravimetry analysis

<sup>4</sup> -Pyrolysis gas chromatography

<sup>5</sup> -Loshatolie

<sup>6</sup> -Pan

DTA، نمونه و مرجع هر دو به وسیله یک منبع گرمایی گرم می‌شوند و اختلاف دمایی ( $\Delta t$ ) بین آن دو ثبت می‌شود. وقتی که انتقالی در نمونه ایجاد شود، به عنوان مثال انتقال شیشه یا یک واکنش اتصال عرضی، اگر این تغییر گرماگیر باشد، نمونه و مرجع هر کدام با گرم کننده‌های ویژه ای گرم میشوند و انرژی لازم برای ثابت نگه داشتن درجه نمونه و مرجع تولید می‌شود. در این حالت، اختلاف قدرت الکتریکی بین نمونه و مرجع ( $d\Delta Q/dt$ ) ثبت می‌شود. نمایش شماتیک سلولهای DTA و DSC در شکل (6-1) نمایش داده است.

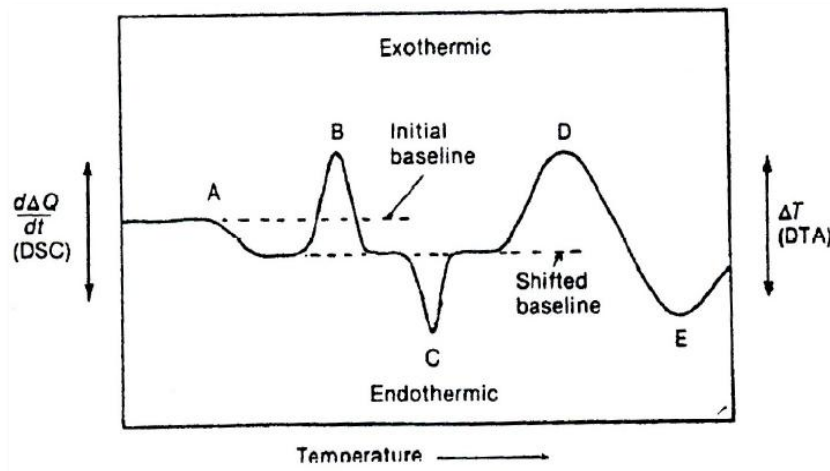


شکل (6-1) نمایش شماتیک دستگاههای DTA و DSC

اطلاعات بر حسب  $\Delta t$  برای DTA،  $d\Delta Q/dt$  برای DSC بر روی محور عرضها در برابر دما ترسیم میشوند. چنین نمودارهایی دمانگاره<sup>1</sup> نامگذاری میشوند. گرچه  $\Delta t$  و  $d\Delta Q/dt$  رابطه خطی ندارند، اما هر دو به ظرفیت گرمایی ارتباط دارند. بنابراین، دمانگاره‌های DTA و DSC شکل یکسانی دارند. مزیت اصلی DSC این است که مساحت پیکهای دمانگاره‌ها ارتباط مستقیم با تغییرات آنتالپی نمونه دارد. از اینرو، ممکن است برای اندازه‌گیری ظرفیتهای گرمایی، گرمای ذوب، آنتالپی واکنشها و کمیتهای مشابه استفاده شود. دمانگاره ایده‌آل DTA و DSC برای یک پلیمر فرضی قابل بلوری شدن در

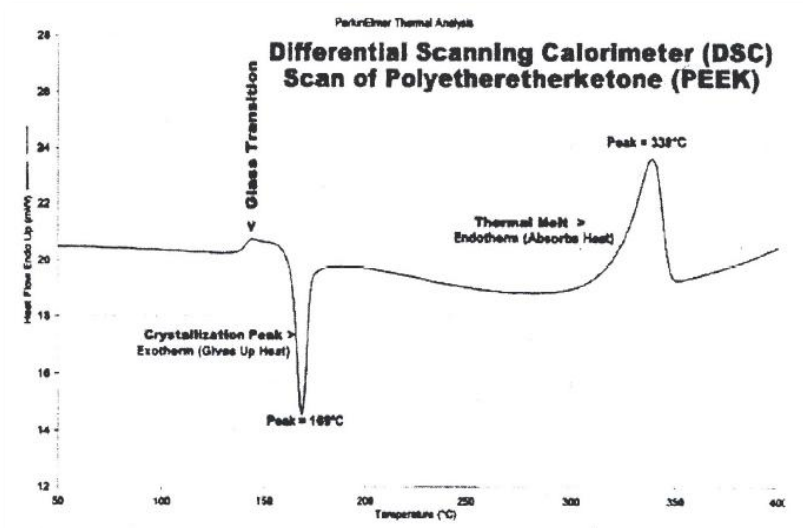
<sup>1</sup> -Thermogram

شکل (7-1) نشان داده شده است که در آن انواع تحولات قابل توجه داده شده است.



شکل (7-1) دمانگاره ایده‌آل DTA و DSC برای یک پلیمر فرضی قابل بلوری شدن

- دمانگاره پلی (اترکتون) برای مقایسه در شکل (8-1)
- نشان داده شده است. چون ظرفیت گرمایی نمونه افزایش می‌یابد. انتقال شیشه موجب یک جابه‌جایی گرماگیر در مسیر اصلی تغییر می‌شود.

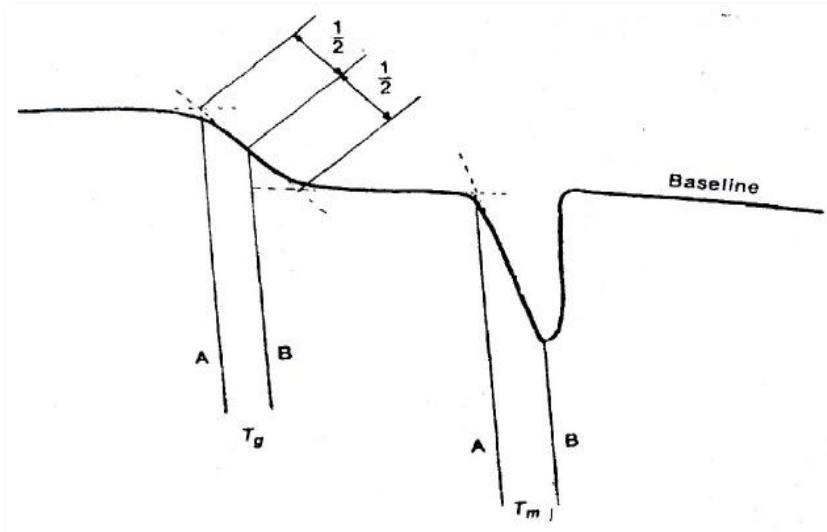


شکل (8-1) دمانگاره واقعی پلی (اترکتون)

تحولات گرماگیر، در این دمانگاره‌ها در زیرخط اصلی قرار می‌گیرند و تحولات گرمازا در بالای خط اصلی<sup>1</sup> واقع می‌شوند. در گزارش درجه حرارت تغییرات مذکور، مهم است که مشخص شود

<sup>1</sup> -Baseline

کدام یک مربوط به آغاز<sup>1</sup>، کدام یک مربوط به نقطه عطف<sup>2</sup> یا ماکزیمم پیک میباشد، که در شکل (9-1) نشان داده شده است [15، 16].



شکل (9-1) دماهای انتقال گزارش شده: (A) در آغاز و (B) در نقطه عطف یا ماکزیمم  $T_g$  دمای انتقال شیشه و  $T_m$  دمای ذوب بلورین میباشد.

### 3-1-4-1 دمای انتقال شیشه ( $T_g$ )

در یک مذاب پلیمری، زنجیرها قادرند حرکات انتقالی (مرکزجرم) انجام دهند. حرکات چرخشی اسکلت پلیمری نیز فعال هستند. با سرد کردن مذاب به مقدار کافی، ممکن است شیشه ای شدن اتفاق بیفتد، به طوری که هم حرکات انتقالی و هم حرکات چرخشی متوقف شود و یک جامد شیشه ای شکننده تشکیل شود. با این حال، یک ناحیه دمایی حد واسط وجود دارد که در آن، اگرچه ماده جامد است، ولی حرکات چرخشی اسکلت پلیمری فعال هستند. پلیمر جامد، تا حدودی انعطاف پذیر بوده و رفتار لاستیکی و چرم مانند (اگر بلورها وجود داشته باشند) نشان میدهد. دمایی که در آن، جزء بیشکل یک پلیمر جامد از حالت انعطاف پذیر به حالت شیشه ای تغییر میکند، دمای انتقال شیشه ( $T_g$ ) نامگذاری می-شود.  $T_g$ ، دمایی است که در آن، چرخش اسکلت پلیمر بر اثر سرد شدن متوقف و بر اثر گرم شدن فعال میشود.  $T_g$ ، از خواص مهم پلیمرها میباشد، زیرا، در بالاتر از آن پلیمر میتواند قالبگیری شده و شکلی را بپذیرد که در سرد شدن تا زیر  $T_g$  حفظ شود. افزون بر آن، مواد کشسان تنها در دماهای بالاتر از  $T_g$  خواص شبه لاستیک نشان میدهند و در دماهای کمتر از آن، به شیشه ای شکننده تبدیل میشوند.  $T_g$  در پوششهای سطوح، عاملی مهم است، زیرا اگر  $T_g$  پلیمر مورد استفاده در پوشش،

<sup>1</sup> -Onset

<sup>2</sup> -Infection point



بالتر از محدوده دمایی مورد نظر باشد، فیلمی شکننده تولید میشود.  $T_g$  پلیمرهای امولسیونی به دمایی که در آن پلیمر یک فیلم همدوس تولید میکند (کمترین دمای تشکیل فیلم) بستگی دارد [17].

اگر یک پلیمر به طور کامل بلورین باشد،  $T_g$  دیده نخواهد شد و  $T_m$  ظاهر خواهد شد. ولی چون بیشتر پلیمرها حالت نیمه بلورین دارند، یعنی بخشهای بی شکل<sup>1</sup> و بلورین را با هم دارا میباشند، هر دو عامل در آنها دیده میشود. به طور کلی،  $T_m$  در یک پلیمر  $1/4-1/7$  برابر  $T_g$  آن است. برای اندازه گیری  $T_g$ ، میتوان هم از روشهای مکانیکی وهم از روشهای گرماسنجی استفاده کرد. در روش مکانیکی، تغییر درخواص فیزیکی پلیمرها در حین عبور از حالت شیشهای به لاستیکی دنبال میشود، مانند: سختی، حجم، افزایش طول تا مرحله پارگی، نفوذپذیر، مدول<sup>2</sup> و حلالیت گازها [18]. همان طوری که انتظار میرود، این مرحله گذار با جنبش مولکولی وسیعتر و درجه آزادی چرخش بیشتری همراه است و نتیجه آن جنبش بیشتر واحدهای زنجیری میباشد. پیش بینی شده است که زنجیرهای بین 20 تا 50 اتمی در  $T_g$  دارای چنین جنبشی باشند. روشن است که برای افزایش این جنبش، فضای مابین اتمها باید افزایش یابد که به عبارت دیگر، منجر به افزایش حجم آزاد میشود. دمایی که در آن این تغییر ویژه در حجم انجام میگردد، به طور معمول به وسیله دیلاتومتری (اندازه گیری حجم) مشاهده میشود و میتواند به عنوان معیاری از اندازه  $T_g$ ، مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات دیگری درماهیت ماکروسکوپی در مرحله انتقال شیشه استحکام است که به طور محسوسی کاهش مییابد و این کاهش به راحتی به وسیله اندازه گیریهای مکانیکی مشخص میشود. ضریب انکسار و هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی نیزتغییر میکنند [19].

عوامل مؤثر بر  $T_g$ ، به شرح زیر می باشند [17، 18، 20].

#### 1-3-1-4-1 انعطاف پذیری زنجیر

انعطاف پذیری زنجیر، با سهولت چرخش حول پیوندهای ظرفیتی اولیه تعیین میشود. پلیمرهایی که ممانعت کمی بر چرخش داخلی حول پیوندهایشان مواجه هستند، مقادیر  $T_g$  پایینی دارند. گروههای آلیفاتیک با زنجیر طویل و اتصالات اتری و استری، انعطاف پذیری زنجیر را افزایش میدهند، درحالی که گروههای سخت مانند ساختارهای حلقوی، اسکلت اصلی را محکم و سخت میکنند استفاده از بخشهای آروماتیک (حلقههای سخت فنیل) در مولکول، باعث افزایش  $T_g$  می شود (ایجاد نواحی صلب). گروههای جانبی حجیم و سخت که

<sup>1</sup> -Amorphous

<sup>2</sup> -Module

نزدیک زنجیر اصلی میباشند، ممانعت فضایی ایجاد نموده و تحرک زنجیر را کاهش میدهند، بنابراین  $T_g$  را بالا میبرند. تأثیرگروههای جانبی در افزایش سختی زنجیر، به انعطاف پذیری گروه بستگی دارد، نه به اندازه آن. در حقیقت، گروههای جانبی به نسبت انعطاف پذیر، اثرات کمی در هر سری دارند، ولی در عوض باعث جدایی بیشتر زنجیرها از هم می - شوند، در نتیجه حجم آزاد را افزایش میدهند و باعث آفت  $T_g$  میشوند. وجود پیوندهای انعطاف پذیر، مانند: C-O و Si-O کاهش در  $T_g$  را به دنبال دارند. حضور هترواتمهایی نظیر اکسیژن، که ظرفیتی کمتر از کربن دارند، انعطاف پذیری زنجیر را افزایش داده و  $T_g$  را کاهش میدهند.

#### 2-3-1-4-1 عوامل هندسی

عوامل هندسی مانند؛ تقارن اسکلت اصلی و حضور پیوندهای دوگانه در زنجیر اصلی بر  $T_g$  تأثیر میگذارند. پلیمرهایی که تقارن ساختاری دارند،  $T_g$  بالاتری نسبت به پلیمرهای نامتقارن دارند (افزایش بلورینگی<sup>1</sup>). عامل هندسی مؤثر دیگر، ساختارهای سیس و ترانس است. پیوندهای دوگانه در فرم سیس، سد انرژی چرخشی را برای پیوندهای مجاور کاهش میدهد و زنجیر را نرم میکند، بنابراین  $T_g$  کاهش میدهد.

#### 3-3-1-4-1 نیروهای جاذبه بین زنجیری

پیوندهای بین ملکولی در پلیمرها، ناشی از نیروهای جاذبه ثانویه است. حضور پیوندهای بن مولکولی قوی در زنجیر یک پلیمر، یعنی دانسیته بالایی از انرژی چسبندگی، که  $T_g$  به مقدار چشمگیری افزایش میدهد. اثر فضایی گروههای آویزان، در سریهای (-CN,-Cl,-CH<sub>3</sub>) یکسان است، ولی قطبیت<sup>2</sup> افزایش مییابد (از راست به چپ) و با افزایش قطبیت،  $T_g$  افزایش می - یابد. پیوندهای هیدروژنی و پیوندهای اولیه یونی بین مولکولی نیز باعث افزایش  $T_g$  میشوند. پیوندهای ثانویه، تنها در فواصل کوتاه مولکولی مؤثرند. بنابراین، هر عامل ساختاری که باعث افزایش فاصله زنجیرها از هم باشد، دانسیته انرژی چسبندگی را کم میکند و  $T_g$  را کاهش می - دهد.

#### 4-3-1-4-1 کوپلیمری شدن

دمای تبدیلات  $T_g$  و  $T_m$ ، شاخصهای مهم تکنولوژیکی در پلیمرها هستند. در واقع، بسیار مهم است که بتوان  $T_g$  و  $T_m$ ، را بطور مستقل کنترل نمود. شیمیدانان پلیمر، این مشکل را تا حدی با اصلاح پلیمرها به وسیله کوپلیمری کردن و انتزاع چندگانه حل کردند. کوپلیمری شدن، تنها  $T_g$  به

<sup>1</sup> -Crystallinity

<sup>2</sup> -Polarity

وضعیت میانی  $T_g$  های دو هموپلیمر انتقال میدهد و باعث تغییر محدوده دمایی یا شکل پذیری در ناحیه تبدیل نمیشود.

#### 1-4-1-3-5 وزن مولکولی

از آنجایی که در یک پلیمر، قسمت انتهایی زنجیرها از یک طرف محدود است، حرکت در این قسمتها بیشتر از قسمت‌های میانی میباشد. بنابراین در یک دمای معین، انتهای زنجیرها حجم آزاد بیشتری برای تحرک مولکولی فراهم میکنند. با افزایش درجه پلیمری شدن،  $T_g$  افزایش مییابد، ولی با افزایش تعداد انتهای زنجیرها (یعنی کاهش وزن مولکولی) حجم آزاد در دسترس افزایش مییابد و در نتیجه، افتی در  $T_g$  مشاهده میشود. این اثر در وزنه‌های مولکولی پایین محسوستر است، ولی در وزنه‌های مولکولی بالا  $T_g$  تغییرات ناچیزی نشان میدهد.

#### 1-4-1-3-6 شاخه‌دار شدن و اتصالات عرضی

طبق تعریف، اتصالات عرضی شامل تشکیل اتصالات بین مولکولی از طریق پیوندهای شیمیایی است. این فرآیند، منجر به کاهش تحرک زنجیر میشود و بنابراین  $T_g$  افزایش مییابد. برای سیستمی با اتصالات عرضی کم، مانند لاستیک ولکانیزه،  $T_g$  افزایش ملایمی نسبت به پلیمر بدون اتصال عرضی نشان می‌دهد. برای سیستم‌های دارای اتصالات عرضی زیاد، مانند اپوکسی رزینها و فنولیک رزینها، دمای انتقال شیشه به طور معمول نامعین است، زیرا، طول زنجیرمولکولی بین اتصالات عرضی کوچکتر از اندازه مورد نیاز برای حرکات هماهنگ موضعی میباشد. شاخه‌دار شدن به وسیله گروه‌های جانبی طویل و انعطاف‌پذیر، فاصله بین زنجیرها را افزایش میدهد و حجم آزاد را بیشتر میکند و در نتیجه  $T_g$  را کاهش میدهد.

#### 1-4-1-3-7 تبلور پذیری

در پلیمرهای نیمه بلورین، کریستالیتها را میتوان مانند اتصالات عرضی فیزیکی در نظر گرفت، که باعث تقویت و استحکام ساختار میشوند، در نتیجه با افزایش درجه تبلور پذیری،  $T_g$  نیز افزایش خواهد یافت.

#### 1-4-1-3-8 پلاستیکی شدن<sup>1</sup>

پلاستیکی شدن، توانایی ماده برای پلاستیکی شدن یا تغییر شکل دادن دائمی است. بنابراین پلاستیکی شدن فرآیند القای خاصیت سیالیت پلاستیکی در مواد میباشد. در پلیمرها، این فرآیند تا حدودی با افزایش ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم، موسوم به نرمکنندهها<sup>2</sup>، میتواند صورت گیرد

<sup>1</sup> -Plasticization

<sup>2</sup> -Plasticizers

نرمکنندهها اغلب مایعات آلی غیر پلیمری با نقطه جوش بالا هستند. آنها با پلیمرها امتزاج پذیرند و در پلیمرها باقی میمانند. اضافه کردن نرمکنندهها به یک پلیمر حتی در مقادیر بسیار کم،  $T_g$  پلیمر را به شدت کاهش میدهد. مثال خوبی در این مورد، پلی (وینیل کلراید) است که در حالت عادی مادهای سخت است، اما با اضافه کردن نرم کنندههایی مانند، دیاکتیل فتالات (DOP) به یک ماده انعطاف پذیر تبدیل میشود. اثر نرم کنندهها بر  $T_g$  به شیوههای مختلفی تفسیر می گردد. نرمکنندهها با عمل انحلال، موجب افزایش فاصله بین مولکولی و در نتیجه کاهش نیروهای بین مولکولی میشوند. از طرف دیگر، افزایش نرمکنندهها منجر به افزایش سریع بخش - های انتهایی زنجیر میشود و حجم آزاد را افزایش میدهد. یک سیستم پلاستیکی شده را میتوان مانند یک پلیمر امتزاجی<sup>1</sup> فرض کرد که در آن نرمکنندهها حکم جزء دوم را دارد.

#### 4-1-4-1 دمای ذوب بلورین ( $T_m$ )

یک فرآیند گذار مرتبه اول است، که در منحنی مربوط به تغییرات خواص نسبت به دما در نقطه  $T_m$  به صورت یک ناپیوستگی مشخص میشود. در این دما، نقاط بلوری پلیمر در صورت وجود، حالت بیشکل (لاستیکی) به خود میگیرند که علت آن، از بین رفتن پیوندهای بین مولکولی است [18].

#### 5-1-4-1 تجزیه گرما-وزنی (TGA)

TGA برای تعیین مقاومت گرمایی پلیمرها استفاده شده است. مانند DTA و TGA نیز یک تکنیک قدیمی است. اما فقط از سال 1960 برای پلیمرها بکار برده شده است. روش TGA که به میزان وسیعی استفاده شده است، بر اساس اندازهگیری پیوسته وزن بر روی یک ترازوی حساس (معروف به ترموبالانس) میباشد، که در آن دمای نمونه در هوا یا در حین یک جو بی-اثر افزایش مییابد. این تحولات به TGA غیر ایزوترمال نسبت داده میشود. اطلاعات مربوطه، به صورت یک ترموگرام وزن در برابر دما ثبت میشوند. اجزاء نوعی یک دستگاه TGA در شکل (10-1) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> -Polyblend polymer