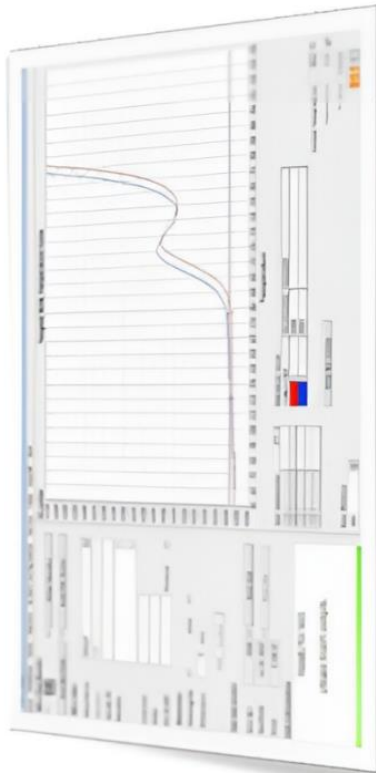


PREPARED BY
ProWinDingTech

Tangent Delta Curve Analysis



www.prowindingtech.ir



ProWindingTech

تحلیل مسحنی تانژانت دلتا، ضریب تلفات دی الکتریک

برای سیم های سیم پیچی

تحلیل منحنی تانژانت دلتا، ضریب تلفات دی الکتریک برای سیم های سیم پیچی:

منحنی تانژانت دلتا (یا ضریب تلفات دی الکتریک) یکی از ابزارهای کلیدی برای بررسی رفتار الکتریکی عایق ها در سیم های سیم پیچی است. این منحنی اطلاعات مفیدی درباره وضعیت و کیفیت عایق ارائه می دهد.

تانژانت دلتا چیست؟

تانژانت دلتا ($\tan \delta$) نسبت بین توان اتلافی و توان ذخیره شده در یک ماده دی الکتریک است. این مقدار شاخصی از تلفات انرژی در عایق محسوب می شود. تلفات دی الکتریک عمدتاً ناشی از:

۱. هدایت الکتریکی جزئی.
۲. قطبش مولکولی ناقص.
۳. تخریب عایق بر اثر رطوبت یا آلودگی.

چرا تانژانت دلتا برای سیم های سیم پیچی مهم است؟

۱. کنترل کیفیت عایق: هرچه مقدار $\tan \delta$ بیشتر باشد، نشان دهنده افت کیفیت عایق یا وجود نقص در ماده عایقی (مانند رطوبت، ترک، یا آلودگی) است.
۲. پیشگیری از خرابی ها: مقادیر غیرطبیعی $\tan \delta$ می تواند هشداردهنده باشد و از خرابی سیم پیچ در طول بهره برداری جلوگیری کند.
۳. ارزیابی پیری عایق: با گذشت زمان، مواد عایقی دچار تغییرات فیزیکی و شیمیایی می شوند که منجر به افزایش $\tan \delta$ می شود.

نمودار $\tan \delta$ چگونه به دست می آید؟

۱. تجهیزات: تست معمولاً با استفاده از دستگاه هایی مانند پل خازنی، آنالایزر تلفات دی الکتریک، یا سیستم تست فرکانس پایین و متوسط انجام می شود.

۲. روش کار:

- یک ولتاژ متناوب به سیم‌پیچ یا نمونه عایق اعمال می‌شود.

- تغییرات جریان و زاویه اختلاف فاز میان ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شود.

- $\tan \delta$ به صورت تابعی از ولتاژ یا فرکانس رسم می‌شود.

تفسیر منحنی تانژانت دلتا:

- مقدار کم $\tan \delta$: نشان‌دهنده عملکرد مناسب و کیفیت بالای عایق.

- افزایش $\tan \delta$ با ولتاژ: اگر منحنی $\tan \delta$ با افزایش ولتاژ شیب تندتری بگیرد، ممکن است نشان‌دهنده وجود نقاط ضعف در عایق باشد (مانند تخریب موضعی).

- افزایش $\tan \delta$ در فرکانس‌های پایین: معمولاً ناشی از وجود رطوبت یا آلودگی در عایق.

- افزایش $\tan \delta$ در فرکانس‌های بالا: می‌تواند ناشی از تخریب شیمیایی یا تغییرات ساختاری عایق باشد.

چه عواملی بر $\tan \delta$ تأثیر می‌گذارند؟

۱. مواد رزینی و عایقی: نوع و کیفیت رزین یا لعاب استفاده‌شده روی سیم‌ها.

۲. رطوبت و آلودگی: وجود این عوامل باعث افزایش قابل توجه $\tan \delta$ می‌شود.

۳. فرایند تولید: نواقص تولید، مانند عدم یکنواختی در پوشش رزین یا حباب‌های هوا (پین‌هول)، تأثیر مستقیمی بر $\tan \delta$ دارند.

۴. دمای محیط: $\tan \delta$ معمولاً با افزایش دما بیشتر می‌شود.

استانداردها:

- مقادیر معمول $\tan \delta$ بسته به نوع عایق و استانداردهای صنعتی متفاوت است، اما به طور کلی، مقادیر بالاتر از ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ ممکن است نشان‌دهنده مشکل در عایق باشد.

کاربرد عملی در سیم‌های سیم‌پیچی بهمن:

برای کنترل کیفیت:

- تست $\tan \delta$ روی سیم‌های تولیدی انجام دهید تا نقاط ضعف احتمالی عایق شناسایی شود.

- در صورت مشاهده مقادیر غیرطبیعی، بررسی‌هایی نظیر ارزیابی رطوبت، آلودگی، یا یکنواختی رزین انجام شود.

در تست تانژانت دلتا مثلاً برای رزین پلی استرایمید با افزایش دما دو نمودار رسم می شود که از شیب منحنی دو دما و دو ضریب تلفات نتیجه می دهد.

در تست تانژانت دلتا ($\tan \delta$) برای رزین‌هایی مثل پلی‌استرایمید، تغییر دما تأثیر مستقیمی بر رفتار الکتریکی و دی‌الکتریک رزین دارد. تحلیل دو نمودار $\tan \delta$ بر اساس دما و شیب منحنی‌ها می‌تواند اطلاعات مهمی درباره کیفیت و عملکرد عایق ارائه دهد. در ادامه نحوه تحلیل این نمودارها توضیح داده می‌شود:

۱. رفتار $\tan \delta$ با افزایش دما

- با افزایش دما، معمولاً مقدار $\tan \delta$ ابتدا به صورت ملایم افزایش می‌یابد و سپس به صورت غیرخطی افزایش می‌کند.

- این رفتار نتیجه تغییرات زیر است:

الف) افزایش حرکت مولکولی: در دماهای بالاتر، مولکول‌های رزین حرکت بیشتری دارند که باعث افزایش تلفات دی‌الکتریک می‌شود.

ب) تخریب حرارتی: در دماهای بحرانی، رزین ممکن است دچار تغییر ساختاری یا تجزیه شود که $\tan \delta$ را به شدت افزایش می‌دهد.

۲. دو منحنی در تست:

معمولاً دو نمودار از تست رسم می‌شود:

الف) منحنی $\tan \delta$ در دمای پایین تا متوسط (مثلاً ۲۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد):

- این ناحیه برای بررسی عملکرد طبیعی رزین و شناسایی تلفات پایه در محدوده دمای کاری معمولی استفاده می‌شود.

- مقدار $\tan \delta$ در این محدوده باید پایین و نسبتاً پایدار باشد.

ب) منحنی $\tan \delta$ در دماهای بالاتر (مثلاً ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد):

- این ناحیه تغییرات غیرخطی و افزایش شیب $\tan \delta$ را نشان می‌دهد که به دلیل تخریب یا عبور از دمای گذار شیشه‌ای

(T_g) رخ می‌دهد.

*دمای گذار شیشه‌ای (Tg) یک اصطلاح علمی پذیرفته شده و متداول در علوم پلیمر و مواد است و به نقطه‌ای اشاره دارد که در آن، یک ماده آمورف (مانند شیشه یا پلیمرهای بی‌شکل) از حالتی سخت و شکننده به حالتی نرم و لاستیکی تغییر می‌کند. با این حال، اگر بخواهید اصطلاحی دقیق‌تر یا ساده‌تر برای توضیح این مفهوم ارائه دهید، می‌توان از عباراتی مثل زیر استفاده کرد:

۱- دمای تغییر حالت به حالت لاستیکی
این عبارت بر جنبه عملکردی تغییر در خواص ماده تأکید می‌کند.

۲- دمای نرم‌شدگی پلیمر
مناسب برای بیان فرآیند نرم شدن ماده در دمای خاص.

۳- دمای انتقال فیزیکی ماده
این اصطلاح کلی‌تر است و به انتقال در ویژگی‌های فیزیکی اشاره دارد.

۴- دمای شروع انعطاف‌پذیری
بر جنبه کاربردی در تغییر حالت ماده تمرکز دارد.

۵- دمای تغییر خواص مکانیکی
اگر بخواهید این موضوع را از دید مهندسی مواد توضیح دهید.

با این حال، بهتر است هنگام تغییر اصطلاح از استانداردهای علمی و مخاطبان هدف خود اطمینان حاصل کنید، زیرا دمای گذار شیشه‌ای (Tg) همچنان در جوامع علمی و صنعتی پذیرفته‌تر و دقیق‌تر است.

- شناسایی دمای بحرانی و شیب منحنی در این ناحیه برای تعیین محدوده دمای ایمن رزین مهم است.

۳. تحلیل شیب منحنی‌ها:

شیب منحنی $\tan \delta$ با دما می‌تواند اطلاعات زیر را ارائه دهد:

۱. شیب کم در ناحیه دمای پایین: نشان‌دهنده کیفیت بالای عایق و پایداری در برابر تلفات دی‌الکتریک است.

۲. افزایش تدریجی $\tan \delta$: معمولاً ناشی از تغییرات قطبش مولکولی و طبیعی است.

۳. افزایش ناگهانی $\tan \delta$ در دماهای بالا: نشان‌دهنده دمای بحرانی یا شروع تخریب حرارتی رزین است.

۴. دو نقطه کلیدی از منحنی‌ها:

در این تحلیل، معمولاً دو دما و دو مقدار $\tan \delta$ که از منحنی استخراج می‌شود، اهمیت دارد:

۱. دمای گذار شیشه‌ای (Tg):

- این دما جایی است که رزین از حالت سخت و شکننده به حالت نرم و پلاستیکی تغییر می‌کند.

- $\tan \delta$ در این دما معمولاً افزایش چشمگیری نشان می‌دهد.

۲. دمای تخریب یا بحرانی:

- این دما جایی است که تخریب شیمیایی یا ساختاری رزین آغاز می‌شود.

- شیب منحنی در این ناحیه بسیار زیاد است.

۵. تفسیر و استفاده از نتایج:

۱. تلفات پایین در محدوده دمای کاری: اگر $\tan \delta$ در دماهای پایین و متوسط کم باشد (کمتر از ۰/۰۲)، رزین برای کاربردهای الکتریکی مناسب است.

۲. دمای کاربری ایمن: دمایی که قبل از افزایش غیرخطی $\tan \delta$ اتفاق می‌افتد، نشان‌دهنده محدوده ایمن دمایی رزین است.

۳. مقایسه با استانداردها:

- مقادیر $\tan \delta$ و دماهای مربوطه را با مقادیر مرجع یا استاندارد مقایسه کنید.

- اگر $\tan \delta$ در دماهای پایین بیش از حد مجاز باشد، ممکن است رزین دچار نقص تولیدی یا آلودگی باشد.

۴. شیب منحنی در ناحیه تخریب:

اگر شیب در ناحیه تخریب خیلی زیاد باشد، نشان‌دهنده رفتار غیرپایدار رزین در دماهای بالا است.

۶. نکات مهم برای رزین پلی‌استرایمید:

- ویژگی‌های این رزین: پلی‌استرایمید مقاومت حرارتی و دی‌الکتریک بالایی دارد و معمولاً $\tan \delta$ آن تا دمای ۱۸۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد باید کم باقی بماند.

- کنترل کیفیت: اگر $\tan \delta$ در دماهای پایین بالا باشد، ممکن است به دلایل زیر باشد:

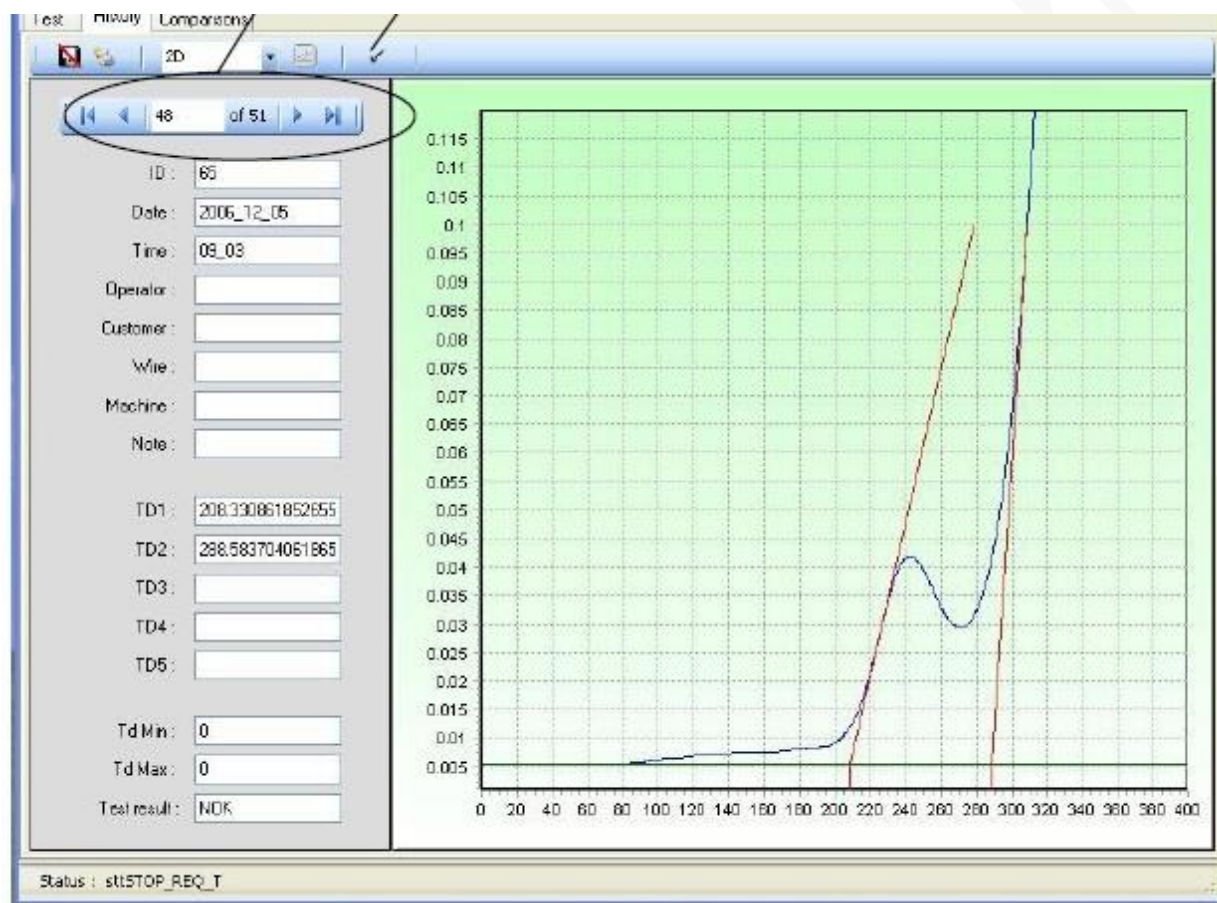
۱. وجود رطوبت یا آلودگی.

۲. فرایند پخت ناقص.

۳. ناپیوستگی در رزین (پین‌هول).

جمع‌بندی:

- مقادیر و شیب $\tan \delta$ در دماهای مختلف، کیفیت و محدوده دمای ایمن رزین را نشان می‌دهد.
- دو دما (دمای گذار شیشه‌ای و تخریب) و رفتار منحنی در این نقاط کلیدی برای ارزیابی پایداری رزین استفاده می‌شوند.
- افزایش $\tan \delta$ در دماهای پایین معمولاً ناشی از نقص یا آلودگی است، در حالی که در دماهای بالا ناشی از تخریب یا ناپایداری حرارتی است.



برای تحلیل نمودار بارگذاری شده (مربوط به تست تانژانت دلتا)، ابتدا اجزای کلیدی آن را بررسی می‌کنیم:

۱. توصیف کلی نمودار:

- محور افقی (X): دما (احتمالاً به درجه سانتی‌گراد) است که نشان‌دهنده افزایش دما در طول تست است.
- محور عمودی (Y): مقدار تانژانت دلتا ($\tan \delta$) را نشان می‌دهد که ضریب تلفات دی‌الکتریک را بیان می‌کند.

- دو منحنی روی نمودار قابل مشاهده است که نشان‌دهنده تغییرات $\tan \delta$ برای دو نمونه یا دو بار تست مختلف است.

۲. تحلیل ویژگی‌های نمودار:

۱. ناحیه پایین دما (۰ تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد):

- مقدار $\tan \delta$ نسبتاً پایین و تقریباً ثابت است.

- این نشان‌دهنده عملکرد خوب و کیفیت مناسب عایق در دماهای پایین و میانی است.

- در این محدوده، تلفات دی‌الکتریک عادی بوده و تخریب قابل توجهی وجود ندارد.

۲. ناحیه میانی دما (۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد):

- شروع افزایش تدریجی $\tan \delta$ مشاهده می‌شود.

- این افزایش به دلیل قطبش‌های مولکولی بیشتر در دماهای بالاتر است.

- نقطه‌ی تغییر در شیب می‌تواند مربوط به دمای گذار شیشه‌ای (T_g) رزین باشد.

۳. ناحیه بالای دما (بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد):

- منحنی $\tan \delta$ افزایش ناگهانی و شدیدی دارد.

- این افزایش نشان‌دهنده آغاز تخریب حرارتی یا شکست دی‌الکتریک عایق است.

- مقادیر $\tan \delta$ در این ناحیه از حدود ۰/۰۵ به مقادیر بالاتر از ۰/۱ می‌رسد که معمولاً غیرقابل قبول است.

۳. اطلاعات عددی (مطابق با تصویر بالا):

- دمای TD1: حدود ۲۰۸ درجه سانتی‌گراد است، که احتمالاً به دمای گذار شیشه‌ای (T_g) یا آغاز تغییرات شدید در $\tan \delta$ اشاره دارد.

- دمای TD2: حدود ۲۸۸ درجه سانتی‌گراد است، که نقطه تخریب حرارتی (Thermal Breakdown) یا شکست دی‌الکتریک رزین را نشان می‌دهد.

۴. وضعیت تست (Test Result):

- در بخش Status مشخص شده که تست NOK (Not OK) است، به این معنا که کیفیت عایق با استاندارد مورد نظر همخوانی ندارد. این ممکن است به دلایل زیر باشد:

- وجود ناخالصی یا نقص در رزین.

- کیفیت پایین فرآیند پخت (عدم یکنواختی).

- رطوبت یا آلودگی در عایق.

۵. تفاوت بین منحنی‌ها:

اگر این دو منحنی مربوط به دو نمونه متفاوت باشد:

- منحنی با شیب بیشتر یا $\tan \delta$ بالاتر نشان‌دهنده نمونه‌ای با کیفیت پایین‌تر است.

- اگر دو تست روی یک نمونه انجام شده، این اختلاف ممکن است ناشی از خطای دستگاه یا تغییرات ناخواسته در شرایط تست باشد.

۶. توصیه‌ها:

۱. ارزیابی فرآیند تولید: یکنواختی پخت رزین و کیفیت مواد اولیه بررسی شود.

۲. کنترل رطوبت: اطمینان حاصل کنید که سیم‌ها یا رزین قبل از تست در معرض رطوبت قرار نگرفته‌اند.

۳. تکرار تست: تست را روی نمونه‌های مشابه تکرار کنید تا نتایج تأیید شوند.

۴. مقایسه با استانداردها: مقادیر $\tan \delta$ و نقاط کلیدی را با مقادیر مرجع استاندارد مقایسه کنید.

برای تعیین کلاس حرارتی (Thermal Class) نمونه مورد آزمایش از منحنی تانژانت دلتا ($\tan \delta$)، باید رفتار عایق در دماهای مختلف و به‌ویژه در محدوده‌های بحرانی بررسی شود. کلاس حرارتی عایق بر اساس دمای بیشینه‌ای که ماده می‌تواند به مدت طولانی بدون تخریب قابل توجه کار کند، تعیین می‌شود. در منحنی آپلودشده، با توجه به نقاط کلیدی (TD1 و TD2) می‌توان به کلاس حرارتی نمونه پی برد.

۱. استانداردهای مرجع برای تعیین کلاس حرارتی

کلاس حرارتی عایق‌ها معمولاً بر اساس استانداردهای بین‌المللی مانند IEC 60085 یا NEMA تعیین می‌شود. جدول زیر رایج‌ترین کلاس‌های حرارتی و دماهای مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد:

کلاس حرارتی	دمای بیشینه (C°)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

۲. روش تعیین کلاس حرارتی از نمودار

برای تعیین کلاس حرارتی از منحنی، مراحل زیر را انجام دهید:

الف) تحلیل نقاط کلیدی نمودار:

۱. دمای گذار شیشه‌ای (Tg):

- در نمودار بالا، دمای TD1 (حدود ۲۰۸ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده نقطه‌ای است که در آن $\tan \delta$ شروع به افزایش غیرخطی می‌کند. این می‌تواند بیانگر آغاز تغییرات شدید در ساختار عایق باشد.

۲. دمای تخریب حرارتی (Thermal Breakdown):

- دمای TD2 (حدود ۲۸۸ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده دمایی است که در آن تخریب عایق آغاز شده و $\tan \delta$ به شدت افزایش یافته است. این نقطه معمولاً بالاتر از محدوده کلاس حرارتی واقعی است.

ب) شناسایی محدوده دمایی قابل قبول:

- دمایی که قبل از افزایش شدید $\tan \delta$ در منحنی مشاهده می‌شود (معمولاً بین TD1 و TD2) محدوده‌ای است که عایق هنوز عملکرد مناسبی دارد.

- برای نمونه شما، $\tan \delta$ تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبتاً ثابت است و تغییرات شدید در حدود ۲۱۰-۲۲۰ درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود. این نشان می‌دهد که این نمونه احتمالاً متعلق به کلاس حرارتی ۲۰۰ یا ۲۲۰ است.

۳. تطبیق با کلاس حرارتی:

- از آنجا که در استانداردها، کلاس حرارتی بر اساس دمایی تعریف می‌شود که عایق می‌تواند برای مدت طولانی بدون تخریب قابل ملاحظه کار کند، شما باید:

۱. دمای قبل از تغییرات غیرخطی (TD1) $\tan \delta$ را به عنوان مرجع در نظر بگیرید.

۲. نمونه بالا که در حدود ۲۱۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد مطلوب دارد، احتمالاً در کلاس ۲۰۰ قرار می‌گیرد.

۴. تست طولانی‌مدت برای تأیید کلاس حرارتی:

برای اطمینان از دقت این نتیجه، می‌توانید از تست طولانی‌مدت حرارتی (Thermal Endurance Test) استفاده کنید:

۱. نمونه را در دماهای نزدیک به ۲۰۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵,۰۰۰ تا ۲۰,۰۰۰ ساعت در معرض حرارت قرار دهید.

۲. پس از تست، $\tan \delta$ و سایر خواص عایق را بررسی کنید.

۳. اگر عایق همچنان خواص مکانیکی و دی‌الکتریکی خود را حفظ کرده باشد، کلاس حرارتی تأیید می‌شود.

۵. عوامل مؤثر دیگر:

- رطوبت و آلودگی: وجود این عوامل می‌تواند $\tan \delta$ را حتی در دماهای پایین‌تر افزایش دهد.

- فرایند پخت رزین: اگر رزین به درستی پخت نشده باشد، نتایج ممکن است به اشتباه کلاس حرارتی پایین‌تری نشان دهند.

نتیجه‌گیری:

با توجه به نمودار بالا:

- دمای TD1 (حدود ۲۰۸ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده دمای عملکرد مرزی نمونه است.

- دمای TD2 (حدود ۲۸۸ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده آغاز تخریب حرارتی است.

- نمونه احتمالاً متعلق به «کلاس حرارتی ۲۰۰ یا ۲۲۰» است.