

## בדיקות מעבדה לחומרים פלסטיים

נכתב ע"י - ליאור פיטר,

בדיקות מעבדה, האם הכרחי לבצע בדיקות לחומרים? שאלה העולה פעמים לא מעטות ומחייבת בהחלטה בעלת חשיבות גבוהה האם לבצע בדיקות לחומרי גלם ובהמשך בדיקות עבור מוצרי ביניים ומוצרים סופיים. המטרה העיקרית ביישום בדיקות מעבדה הינה מדידת התכונות הרלוונטיות על פי הגדרת הדרישות המתבקשות, בהתאם לחומר הגלם ולאחר מכן, בשלב השני בחיי המוצר.

התכונות הנמדדות הם תגובה כמותית של החומר לגירוי חיצוני המופעל עליו. לדוגמה אם חלק או מוצר כל שהוא מועמס במשקל מסוים, החומר מגיב בצורה של דפורמציה (מעוות) או שבר, במקרה מסוג זה התכונה המקושרת למצב של דפורמציה הינה המודול והחוזק של החומר.

ניתן לבצע מדידה של תכונות מכמה סיבות כאשר הגורם להם הינו שתי מטרות עיקריות, בשלב ראשוני בתכנון או לצורך אינפורמציה עתידית אשר עשויה לנבא את יכולתו הביצועית של המוצר. מטרה שנייה לצורך בקרת איכות חומר הגלם או המוצר.

הבדיקות יכולות לנבא אומדן לביצועי החומר במשך זמן תפקודו, כדי לבסס את יציבות החומר מבצעים מדידה של התכונות המכאניות ומבצעים התאמה לחישובי החוזק והמאמץ, פעולה דומה מתבצעת גם לגבי התכונות הפיסיקליות החשמליות וכן הלאה.

תנאי הסביבה בהם מתבצעות הבדיקות הנם בעלי חשיבות גבוהה, תנאי הסביבה הנדרשים לקיום בדיקות מעבדה לחומרי פלסטיק בכללותם מושפעים מהסביבה האופפת. בבדיקות מעבדה רגילות משתנים אלו עשויים להיות מוגבלים לערכי טמפרטורה ולחות ספציפיים המשתנים בהתאם לדרישות הבדיקה. רגישות לאפקט הטמפרטורה נובע בעיקר כתוצאה מעובדה קיימת שרוב חומרי הפלסטיק של ימינו מבוססים על פולימרים המורכבים משרשראות בבעלות שרים חוזרים (backbone) או בעיקר קשרים קובלנטים אטומי פחמן.

ברוב המקרים בדיקות מעבדה מתבצעות בהתאם לשיטות בדיקה סטנדרטיות, הצורך נובע כדי שנתוני הבדיקה, הליך הבדיקה, הציוד שמשמש לצורך הבדיקה התנאים יהיו זהים ושהתוצאות שמתקבלות יהיו מקובלות ומכובדות בכול מקום וניתנים להבנה וקריאה על ידי כל משתמש.

## **אינדקס בדיקות**

### **Mechanical Tests**

Rockwell Hardness  
Shore Hardness  
Barcol Hardness  
Tensile Test  
Flexural Test  
Izod Impact  
Dynatup Impact  
Compressive Strength  
Dynamic Mechanical Analysis (DMA)  
Taber Abrasion  
Tear Resistance Of Plastic Film & Sheeting  
Poisson's Ratio

### **Analytical Tests**

Fourier Transform Infrared Spectrometry – (FTIR)  
Differential Scanning Calorimeter - (DSC)  
Linear Thermal Expansion by (TMA) or Dilatometer  
Thermogravimetric Analysis - (TGA)  
Carbon black content

### **Rheological Tests**

Melt Flow Rate  
Capillary Rheometry

### **Physical Tests**

Density & Specific Gravity  
Bulk Density

### **Electrical Tests**

Surface and Volume Resistivity

### **Thermal Tests**

Differential Scanning Calorimeter - (DSC)  
Linear Thermal Expansion by (TMA) or Dilatometer  
Thermogravimetric Analysis - (TGA)  
Deflection Temperature Under Load - (DTUL OR HDT)

## בדיקות מכאניות

### שם הבדיקה: Rockwell Hardness

שיטת בדיקה: ASTM D785, ISO 2039



שיטת הבדיקה למדידת קשיות חומרים מתבצעת באמצעות הפעלת עומס על דוגמת בדיקה בנקודה ספציפית. תוצאת הקשיות מתקבלת ללא יחידות ונרשמת ברוב המקרים ע"י שימוש באותיות R, L, M, E ו-K המגדירות סקלת מדידה. המספר הגבוהה בכל סקלת מדידה מאפיין את החומר הקשיח יותר בהתאמה.

#### הליך הבדיקה

הבדיקה מתבצעת באופן הבא, ממקמים את דוגמת הבדיקה על משטח בתוך מכשיר בדיקת ה-Rockwell ומפעילים לחץ מזערי על מנת לבצע קריאת איפוס. מפעילים על הדוגמה לחץ מסיבי למשך 15 דקות, בסיום 15 דקות מוודאים את שלמות דוגמת הבדיקה וקוראים את תוצאת הקשיות שהתקבלה.

#### דוגמת הבדיקה

דוגמה סטנדרטית בעובי של 6.4 מילימטר חתוכה מתוך לוח או דוגמה שיוצרה בתבנית.

#### נתוני הבדיקה

נתון הקשיות נקרא ישירות מתוך שעון המדידה בהתאם לסקלה R, L, M, E, K. סקלות המדידה הנפוצות ביותר בחומרי פלסטיק הינם R ו-M.

- טבלת המרה לנתוני קשיות Rockwell מצורפת בנספח א'.

## שם הבדיקה: Shore Hardness

שיטת בדיקה: ASTM D2240



בדיקת שור, בדיקת קשיות המשמשת לקביעת הקשיות היחסית של חומרים רכים, ברוב המקרים פלסטיק. מטרת הבדיקה למודד את עומק חדירה בתנאים מוגדרים בתלות במשך הזמן ובכוח המופעל. ערך הקשיות משמש לקביעת רמת קשיות החומר הנבדק ובנוסף לצורך אינדיקציה בבדיקות בקרת איכות וקבלה של חומרי גלם.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה ממוקמת בתוך מכשיר הבדיקה על גבי משטח ישר וקשיח. המחט במכשיר הבדיקה נלחצת אל תוך דוגמת הבדיקה באופן מקביל לפני השטח. תוצאת הקשיות ניתנת לקריאה לאחר שנייה של מגע בפני שטח הדוגמא או לחילופין ע"פ זמן אחר שהוגדר.

### דוגמת הבדיקה

באופן כללי עובי דוגמת הבדיקה הנדרש הנו 6.4 מילימטר, ניתן לצרף מספר דוגמאות ע"מ להגיע לעובי הנדרש אולם דוגמה בודדת עדיפה.

### נתוני הבדיקה

נתון הקשיות נלקח מתוך סקלה של קשיות שור, הסקלות הנמצאות בשימוש הנרחב ביותר הנם A – D, סקלה A משמשת עבור חומרים רכים וסקלה D משמשת עבור חומרים קשים.

- טבלת המרה לנתוני קשיות Shore מצורפת בנספח א'.

## שם הבדיקה: Barcol Hardness



שיטת בדיקה: ASTM D2583

Barcol שיטת בדיקה המשמשת למדידת קשיות, השיטה מקובלת בתעשייה ובקרב אנשי הנדסה לבדיקת חומרי גלם ומוצרים בגמר תהליך הייצור כדוגמת משטחי "פיברגלס", אקסטרוזיה של פלסטיק, פרופילי אלומיניום וחומרים נוספים. בתחום הפלסטיקה הבדיקה מתבצעת בעיקר בחומרי פלסטיק קשים, משוריינים ולא משוריינים.

### הליך הבדיקה

ממקמים את דוגמת הבדיקה מתחת לאינדיקטור של מתקן המדידה, מפעילים לחץ אחיד על דוגמת הבדיקה עד למצב שהחוגה מגיעה לנקודת המקסימום. עומק החדירה מומר למספר Barcol אבסולוטי.

### דוגמת הבדיקה

עובי דוגמת הבדיקה, לפחות 1/16 אינץ'.

### נתוני הבדיקה

תוצאת המדידה נרשמת במספר Barcol.

## שם הבדיקה: Tensile Test

שיטת בדיקה : ASTM D638 , ISO 527



בדיקה המודדת את הכוח הדרוש ע"מ להגיעה לנקודת השבירה של חומר באמצעות דוגמת בדיקה, בנוסף נמדד שיעור המתיחה או ההתארכות עד לנקודת השבירה. בדיקת מתיחה מלווה בדיאגרמת מאמץ מעוות לצורך סיוע בקביעת מודול המתיחה.

נתוני הבדיקה מרוכזים במפרט החומר / מוצר, כדי לפרט את עמידותו. בנוסף ניתן להשתמש בנתוני הבדיקה לצורך אינדיקציה בביקורת איכות חומר גלם. תכונות פיסיקליות של רוב החומרים בייחוד חומרים תרמופלסטיים עשויים להיות תלויים בטמפרטורה האופפת, מכאן ישנה חשיבות לבצע את הבדיקה בסביבה מבוקרת טמפרטורה.

### הליך הבדיקה

ממקמים את דוגמת הבדיקה בתוך התקן המדידה בין שתי טפסניות ומהודקים בשתי קצותיה. מפעילים לחץ מתיחה על דוגמת הבדיקה עד להופעת כשל. מהירות הבדיקה נקבעת בהתאם לשיטת הבדיקה, לדוגמא: על פי שיטת בדיקה ASTM מהירות הבדיקה נקבעת בהתאם להגדרת החומר, בשיטת בדיקה ISO מהירות

המדידה נעה בין 5 ל - 50 מילימטר לדקה, עבור בדיקת כוח המתיחה, עבור בדיקת התארכות 1 מילימטר לדקה לצורך מדידת המודול. במדידת התארכות ומודול מתיחה נעשה שימוש במד אורך לקבלת התוצאה.

### דוגמת הבדיקה

בהתאם לשיטת הבדיקה. עבור ISO 527 דרישה לדוגמת בדיקה ע"פ ISO 3167 דוגמה רב שימושית.

### נתוני הבדיקה

1. כוח המתיחה, בנקודת הכניעה והשבר.
2. מודול המתיחה
3. מאמץ.
4. התארכות ואחוז ההתארכות בנקודת הכניעה.
5. התארכות ואחוז התארכות בנקודת השבר.

## שם הבדיקה: Flexural Test

שיטת בדיקה: ASTM D790, ISO 178



בדיקת הכפיפה מודדת את הכוח הדרוש ע"מ לכופף קורה באמצעות עומס המופעל בשלוש נקודות. תוצאות הבדיקה משמשות לצורך סיוע בבחירת חומר עבור חלק המתוכנן לעמוד בעומסים מבלי להתכופף. מודול הכפיפה משמש כאינדיקציה לקשיות החומר בזמן כיפוף. התכונות הפיסיקליות של רוב החומרים, בייחוד חומרים תרמופלסטיים יכולות להיות תלויות בטמפרטורה האופפת אותם, מכאן ישנה חשיבות לבצע את הבדיקה בסביבה עם בטמפרטורה מבורקת.

### הליך הבדיקה

ממקמים את הדוגמה במתקן הבדיקה בתוך התקן בעל שתי תמיכות עם מרווח בניהם, לחץ המופעל ממתקן הבדיקה לכיוון מרכז הדוגמה יוצר לחיצה בשלוש נקודות. כתוצאה מכך, ניתן לבדוק את שיעור הכפיפה. הפרמטרים בבדיקה זו הנם המרווח בין התמיכות, מהירות הפעלת העומס ושיעור הסטייה המקסימלי בבדיקה. הפרמטרים מבוססים בהתאם לעובי דוגמת הבדיקה בנוסף להגדרות המופיעות בשיטות הבדיקה ISO ו- ASTM.

### דוגמת הבדיקה

קיים מגוון רחב של דוגמאות בדיקה הניתנות לשימוש, אך הנפוצה ביותר מבניהם הינה בהתאם לשיטת הבדיקה ISO [mm] 10X4X80.

### נתוני הבדיקה

כוח הכפיפה, מאמץ הכפיפה במעוות מסוים ומודול הכפיפה.

## שם הבדיקה: Izod Impact

שיטת בדיקה: ASTM D256, ISO 180



בדיקה המאפשרת למודד את עמידות הדוגמא באימפקט, באמצעות מכת נגיפה המגיעה ממטוטלת הפוגעת בנקודה אחת בדוגמת הבדיקה. בדיקת האימפקט מגדירה את האנרגיה הקנטית הנחוצה לצורך התחלת שבר והמשך עד לנקודת שבר מלא. דוגמת הבדיקה עוברת חירוף כדי למנוע דפורמציה במהלך הבדיקה. הבדיקה יכולה לשמש במהירות וביעילות כבדיקה לבקרת איכות ולאינדיקציה להתאמת חומר לדרישות עמידות באימפקט, כמו כן לצורך השוואת תכונת קשיות לחומרים אחרים.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה מהודקת אל תוך מתקן הבדיקה כאשר החריץ בדוגמת הבדיקה מופנה כלפי כיוון ההכאה של המטוטלת. המטוטלת משוחררת לכיוון דוגמת הבדיקה. תוצאת הבדיקה מתקבלת עם שבר דוגמת הבדיקה, במידה ודוגמת הבדיקה אינה נשברת, מעלים את משקל המשקולת המטוטלת ומבצעים בשנית עד לקבלת שבר. רוב החומרים ובמיוחד חומרים תרמופלסטיים מציגים תוצאה נמוכה בבדיקת אימפקט בטמפרטורות נמוכות מכאן קיימת חשיבות לבצע את הבדיקה בסביבה מאוקלמת לקרוב לטמפרטורת שימוש המוצר.

### בדיקה בטמפרטורה נמוכה

דוגמת הבדיקה מוכנסת אל מקרר או מקפיא מאוקלם בטמפרטורה הדרושה עד לייצוב הטמפרטורה. במהלך הבדיקה דוגמאות הבדיקה מעברות בזריזות למתקן הבדיקה אחת אחת. פרוט תנאי הבדיקה מפרטים בהתאם לשיטת הבדיקה ISO או ASTM, זמן אופייני לאקלום הדוגמא במקפיא הנו 6 שעות וזמן המעבר מהמקפיא למתקן הבדיקה הנו 5 שניות.

### דוגמת הבדיקה

בהתאם ל דרישת ISO דוגמת בדיקה רב תכליתית מסוג 1A מתאפיינת במידות 80X10X4 [mm] עם חריץ בעומק 8 [mm].

### נתוני הבדיקה

בהתאם לשיטת בדיקה ISO נתוני הבדיקה מופיעים ביחידות  $\text{kJ/m}^2$  כוח הנגיפה מחושב ע"י חילוק אנרגיית הנגיפה ב - J לשטח מתחת לחריץ. תוצאת הבדיקה מורכבת ממוצע של 10 דוגמאות שנבדקו. ככל שהתוצאה גבוהה יותר כך החומר קשיח יותר.



## שם הבדיקה: Dynatup Impact

שיטות בדיקה: ASTM D3763, ISO-6603, ISO-7765



בדיקת אימפקט במהירות גבוהה באה לקבוע את קשיות החומר והאנרגיה כאשר החומר סופג מכת הולם. מהירות הבדיקה יכולה להשתנות מכאן, הבדיקה יכולה לדמות נגיפה בטווח רחב של מהירות גבוהה. בדיקת האימפקט מספקת עקומת כוח ואנרגיה בטווח של חלקי השנייה כאשר מתרחשת הנגיפה. נתוני הבדיקה משמשים בהתאמת חומר לאפליקציה המיועדת לעמידה באימפקט. הבדיקה יכולה לשמש בתור אינדיקציה לעמידות החומר בנגיפה בתנאי סביבה קיצוניים שהוגדרו. לדוגמה חומרים תרמופלסטיים מצגים תוצאה נמוכה בכוח נגיפה בטמפרטורות נמוכות, הבדיקה מאפשרת לבצע סימולציה בתנאי הסביבה הנתונים ולבחון את התוצאות המתקבלות.

### מהלך הבדיקה

דוגמת הבדיקה מונחת על תושבת ומהודקת בתוך מתקן הבדיקה, בוחרים את הראש הנגיפה בהתאם לסוג החומר ולאפליקציה הנבדקת מכוונים את המהירות הנדרשת ומבצעים את הבדיקה. בבדיקה המיועדת לדמות סביבה בעלת טמפרטורה נמוכה, נדרש לאקלם את הבדיקה בטמפרטורה הנדרשת עד להגעה למצב של יציבות. במקרים מסוג זה דוגמת הבדיקה מועברת במהירות מהתקן האקלום למתקן הבדיקה, אז מתחילים בביצוע הבדיקה. הזמן האופייני לאקלום דוגמת הבדיקה הינו 6 שעות זמן מעבר מהתקן האקלום למתקן הבדיקה עד 5 שניות.

### דוגמת הבדיקה

דוגמא כמוגדר בשיטת הבדיקה, למרות שניתן לבדוק כל דוגמא שניתן להכניס למתקן הבדיקה ואשר ניתן למקם בצורה יציבה.

### תוצאות הבדיקה

תוצאות הבדיקה שמתקבלות, עקומת עומס, קשיות והאנרגיה המחושבת מהכוח המקסימאלי.

## **שם הבדיקה: Compressive Strength**

שיטת הבדיקה: ASTM D695, ISO 604



בדיקת הדחיסה מתארת את התנהגות החומר בזמן הפעלת עומס בדחיסה. העומס הנו נמוך באופן יחסי ובשיעור אחיד. כוח הדחיסה והמודול הנם שני הערכים הנפוצים המושגים.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה מונחת בין שני משטחי לחיצה מקבילים, עומס אחיד מופעל על דוגמת הבדיקה. העומס המקסימלי נרשם בנוסף לנתוני מאמץ מעוות. ניתן להפעיל מד אורך לצורך קביעת המודול.

### דוגמת הבדיקה

דוגמת הבדיקה יכולה להיות בצורת מלבן או צילינדר, לפי שיטת הבדיקה ASTM מידות דוגמה טיפוסית בצורת מלבן הנם  $12.7 \times 12.7 \times 25.4$  [mm] מידות דוגמת הצילינדר קוטר  $12.7$  [mm] ואורך  $25.4$  [mm] עבור שיטת הבדיקה ISO המידות המועדות לדוגמת הבדיקה  $50 \times 10 \times 4$  [mm] עבור בדיקת מודול ו-  $10 \times 10 \times 4$  [mm] עבור בדיקת חוזק.

### נתוני הבדיקה

מהתוצאות המתקבלות ניתן לחשב את חוזק הדחיסה ואת המודול.

חוזק הדחיסה = עומס הדחיסה המקסימאלי / שטח המינימאלי בסיום הבדיקה.

מודול הדחיסה = שינוי במאמץ / שינוי במעוות.

## שם הבדיקה: Dynamic Mechanical Analysis (DMA)



שיטת בדיקה: ASTM D4065, D4440, D5279

DMA הנה שיטת בדיקה למדידת מודול אלסטיות ( $G'$ ), ויסקו מודול ( $G''$ ) ומקדם  $\tan \Delta$  כפונקציה של הטמפרטורה, התדירות והזמן. תוצאות הבדיקה מופיעות בצורה של פלט גרפי עם נתוני ה- $G'$ ,  $G''$  ו- $\tan \Delta$  כנגד סקלת טמפרטורה. בדיקת ה- DMA מזהה את נקודת המעבר למצב פלסטי ואת ה-  $T_g$  וכמו כן, יכולה לשמש כנתון עבור בקרת איכות או עבור פיתוח מוצרים. בבדיקת ה- DMA קיימת עליונות על בדיקת ה- DSC ע"י יכולת זיהוי נקודות מעבר קטנות בתוך החומר פעולה שמעבר ליכולת הרזולוציה של מכשיר ה- DSC.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה ממוקמת בין שתי טפסניות בעלות יכולת תנועה אשר מורכבות במכשיר הבדיקה ונסגרות בתוך תא בדיקה תרמי. נתוני הבדיקה של החומר הנבדק, תדירות, אמפליטודה וטמפרטורה מוזנים אל תוך מכשיר הבדיקה. מכשיר הבדיקה מופעל והאנליזר מתנועע סביב דוגמת הבדיקה באיטיות בתחום בטמפרטורה שהוגדרה.

### דוגמת הבדיקה

דוגמת הבדיקה האופיינית במידות  $76 \times 13 \times 3$  [mm] שמלקחה ממרכז של דוגמא שיועלה לבדיקה, על פי ASTM מסוג I - לפי ISO דוגמא רב תכליתית.

### נתוני הבדיקה

מודול אלסטיות  $G'$  כתלות בטמפרטורה, תדירות או מעוות.  
ויסקו מודול  $G''$  כתלות בטמפרטורה, תדירות או מעוות.  
מקדם ה-  $\tan \Delta$  כתלות בטמפרטורה, תדירות או מעוות.

## שם הבדיקה: Taber Abrasion

שיטת בדיקה: ASTM D104, D3389, D4060



Taber Abrasion, שיטת הקובעת את עמידות החומר לרוב פלסטיק בשפשוף. עמודות בשפשוף מגדירה את יכולת החומר לעמוד בפני פעולות מכאניות כמו שפשוף שחיקה או ארזיה. קיים קושי להשוות ברמת השפשוף, אך ניתן להבדיל בשוני ברמת עכירות או במדידת משקל לאחר ביצוע הבדיקה.

### הליך הבדיקה

מוודים את משקל הדוגמת הבדיקה או מבצעים בדיקת עכירות. ממקמים את דוגמה במתקן הבדיקה, כאשר ניתן לכוון עומס של 250, 500, או 1000 גרם, אשר מופעל דוגמת הבדיקה במשך הבדיקה באמצעות גלגל השפשוף, מספר הסיבובים נקבע בהתאם לדרישה כמו כן, גם דרגת גלגל השפשוף. בסיום הפעולה דוגמת הבדיקה נמדדת בשנית. העומס המופעל וגלגל השפשוף נקבעים בהתאמה לסוג החומר רך או קשיח.

### דוגמת הבדיקה

נדרשת דוגמה בקוטר של 4 אינץ' או פלטה של 4 אינץ' מרובע עם חומר במרכז בקוטר 1/4 אינץ'.

### נתוני הבדיקה

תוצאות הבדיקה מוצגות בערכים של שינוי האחוזים ברמת העריכות או השינוי המשקל במיליגרמים למחזור סיבוב.

## **שם הבדיקה:** Tear Resistance (Plastic Film & Sheeting)

**שיטת הבדיקה:** ASTM D1004



בדיקת עמידות בפני קריעה באה למדוד את הכוח האולטימטיבי הדרוש לקריעת יריעה. לרוב הבדיקה מתבצעת לצורך בקרת איכות או לצורך בדיקת החומר והשוואה כאשר קיימת ייתכנות לקריעת היריעה.

### הליך הבדיקה

מבצעים מדידת עובי לדוגמת הבדיקה, ממקמים את דוגמת הבדיקה בין שתי טפסניות במתקן הבדיקה. הדוגמה נמתחת במהירות של 2 אינץ' לדקה עד לקריעה.

### דוגמת הבדיקה

הדוגמה נלקחת מתוך יריעה ע"י מקב בצורת C, הדוגמא מעוצבת בצורה היוצרת קריעה אשר מופעל מתח על הדוגמת הבדיקה.

### נתוני הבדיקה

העמידות לקריעה נמדדת ונרשמת ביחידות ניוטון.

## **Poisson's Ratio: הבדיקה**

שיטת הבדיקה: ASTM D 638, ISO 527

בדיקת מקדם פואסון, באה למדוד את שינוי שחל בדוגמת הבדיקה בזמן שכוח חד צירי מופעל על דוגמת הבדיקה. בזמן הפעלת הכוח הדוגמא מתעוותת לא רק בכיוון המשיכה, הכיוון בו מופעל הכוח (אורכי), אלא גם בצידו הרחבי וההיקפי. מקדם הפואסון מבטא את תוצאת המדידה של המאמץ הרחבי כנגד המאמץ הצירי בהפעלת לחץ חד צירי על דוגמת בדיקה.

### הליך הבדיקה

הדוגמה מוכנסת אל מתקן הבדיקה וממוקמת בין שתי טפסניות, מתקן הבדיקה הינו מכשיר "Instron" סטנדרטי. שני רגשי מאמץ מוצמדים אל דוגמת הבדיקה. כוח חד צירי (לחיצת הדוגמה) מופעל במהירות קבועה עד לסיום הבדיקה.

### דוגמת הבדיקה

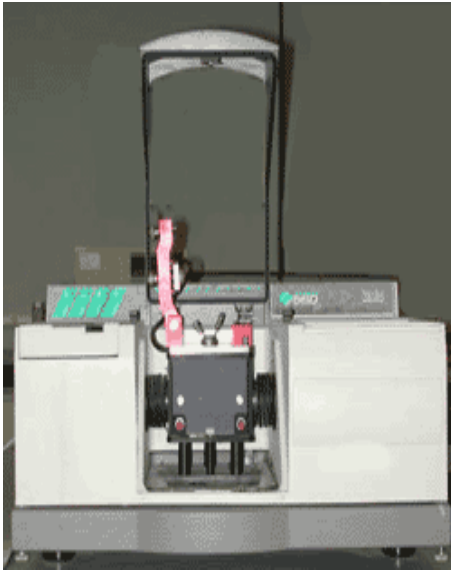
ניתן להשתמש במוט המשמש גם לבדיקת מתיחה תקנית.

### נתוני הבדיקה

מתקבל גרף מאמץ מעוות, מקדם הפואסון מושג ע"י חישוב, היחס בין המשתנים.

## בדיקות אנליטיות

### שם הבדיקה: FTIR - Fourier Transform Infrared Spectrometry



שיטת בדיקה: ASTM E1252

FTIR הינה השיטה הבדיקה הנפוצה ביותר לזיהוי כימיקלים אורגנים ואנאורגניים. בדיקה ב- FTIR יכולה לספק מדד מדויק למספר מרכיבים בתערובת בלתי ידועה. FTIR יישומי באנליזות למוצקים, נוזלים, גזים ובעל יכולת לזהות כימיקלים כדוגמת פולימרים, צבעים, שפכים, צפויים, פורמולציות רפאיות, וחומרים מזהמים. ניתן לומר ש- FTIR הינו מכשיר הבדיקה בעל העוצמה הגבוהה ביותר לזיהוי סוגי קשרים כימיים או קבוצות פונקציונאליות. אורך הגל של האור הנקלט מאפיין את סוג הקשר הכימי בדרך זו ניתן להרכב המולקולה, או לזיהוי הפולימר. FTIR משמש גם לצורך בדיקת זיהוי וגילוי גופים מזהמים או מלאנים בתוך הפולימר כדוגמת מתכות רעילות שנוכחותם אסורה או מותרת בכמויות בודדות על פי דרישות תקינה.

#### הליך הבדיקה

ממקמים את דוגמת הבדיקה בתוך גלאי ב- FTIR, מפעילים את המכשיר במספר תדירויות, אור אינפרא אדום (IR) נקלט בדוגמת הבדיקה, הספקטרום שמתקבל מפוענח לסוג הקשר המתאים דברך כלל באופן אוטומטי ע"י אינפורמציה הקיימת במכשיר הבדיקה.

#### דוגמת הבדיקה

נדרשת דוגמת בדיקה מזערית (מספר גרמים בודדים).

#### נתוני הבדיקה

פלט ספקטרום ממנו ניתן לפענח את סוג הקשרים הכימיים.

## שם הבדיקה: Differential Scanning Calorimeter - (DSC)

שיטת הבדיקה: ASTM D4317, D3418, E1356, ISO – 11357



DSC משמש למדידת הפרמטרים אשר מסייעים לזיהוי חומרים, הבחנה בין הומופולימר לקופולימר או אפיון חומרים בהתאם לביצועים והיכולות התרמיות, ברוב המקרים בדיקה ב-DSC משמשת למציאת הפרמטרים הבאים:

**Tg** – טמפרטורת מעבר זכוכיתית, הטמפרטורה אשר בה פולימר אמורפי או החלקים האמורפיים בפולימר גבישי הופכים ממצב קשה שביר למצב רך גומי (הטמפרטורה נרשמת במעלות צלזיוס).

**Tm** – טמפרטורת ההתכה, הטמפרטורה בה פולימרים גבישיים הופכים להתך.

**$\Delta H_m$**  – כמות האנרגיה הנקלטת בזמן התכת הפולימר ביחידות (joules/gram).

**Tc** – נקודת ההתגבשות, הינה הטמפרטורה בה הפולימר מתחיל בתהליך התגבשות.

**$\Delta H_c$**  – כמות האנרגיה המשתחררת במשך ההתגבשות ביחידות (joules/gram).

### הליך הבדיקה

מכניסים דוגמת בדיקה במשקל 10 עד – 20 מיליגרם אל תוך צלוחית אלומיניום הממוקמת בזמן הבדיקה בתוך מכשיר ה-DSC. דוגמת הבדיקה מחוממת באופן מבוקר בערך של 10 מעלות לדקה. בסיום הבדיקה מתקבל תרשים של זרימת החומר כנגד הטמפרטורה, ערכי הנתונים מתקבלים ע"י אנליזה של התרשים.

### דוגמת הבדיקה

דוגמה במשקל של 10 עד – 20 מיליגרם.

### נתוני הבדיקה

Tg, Tm,  $\Delta H_m$  or  $\Delta H_c$ .



## שם הבדיקה: Linear Thermal Expansion by TMA or Dilatometer

שיטת הבדיקה: ASTM E831, D696, ISO – 11359



בדיקת התפשטות תרמית ליניארית משמשת למדידת שיעור התפשטות החומר כפונקציה של הטמפרטורה. הבדיקה יכולה לסייע למטרת תכנון ולבחון ייתכנות של כשל בחומר במצב של לחצים תרמיים. הבנת המאפיינים של התכווצות והתפשטות באופן יחסי בשני חומרים המחוברים בניהם עשויה להיות בעלת חשיבות להצלחת האפליקציה.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה ממוקמת בתוך מתקן ה-TMA בטמפרטורת החדר, מבצעים מדידה של גובה ע"י אמצעי מדידה. תא הבדיקה מורם, מכוונים את הטמפרטורה ל- 20 מעלות צלזיוס מתחת לטמפרטורה הנמוכה ביותר שנדרשת. דוגמת הבדיקה מחוממת בשיעור קבוע לרוב ב- 10 מעלות צלזיוס לדקה מעבר לטווח הטמפרטורה המבוקשת.

אלטרנטיבה לביצוע הבדיקה ע"י מד התפשטות, ממקמים את דוגמת הבדיקה במד ההתפשטות בטמפרטורת החדר, ממקמים מד גובה ומבצעים איפוס. ממקמים את המערכת באמבט עם טווח טמפרטורה משתנה ומוודים את השינוי בדוגמה בטמפרטורה של -30 מעלות צלזיוס ועד 30 מעלות צלזיוס.

### דוגמת הבדיקה

דוגמת הבדיקה עבור TMA, גובה נדרש בין 2 ל- 10 מילימטר, רוחב עד 10 מילימטר, קצוות הדוגמה נדרשים להיות שטוחים. דוגמת בדיקה עבור מד התפשטות, רוחב 25.5 מילימטר, אורך 75 מילימטר.

### נתוני הבדיקה

מקדם ההתפשטות מחושב מתוצאות הגרף, בהתאם לנוסחה הבאה:

$$dL/(dT * L_0) = (CTE)$$

$$dL - \text{הינו השינוי באורך ב- יחידות } (\mu\text{m}).$$

$$dT - \text{הינו השינוי בטמפרטורה במעלות צלזיוס.}$$

$$L_0 - \text{האורך ההתחלתי ביחידת } (M).$$

## **שם הבדיקה:** Thermogravimetric Analysis (TGA)



שיטת הבדיקה: ASTM E1131, ISO 11358

בדיקת ה-TGA באה למדוד את האחוז המשקלי מדוגמת הבדיקה שהולך לאיבוד בזמן חימום דוגמת הבדיקה בשיעור אחיד בסביבה מבוקרת. איבוד משקל הדוגמה בטווח טמפרטורה מוגדר, נותן אינדיקציה למרכיבי הדוגמה כולל מרכיבים נדיפים ומלאנים עצלים. כמו כן, אינדיקציה עבור יציבות תרמית של החומר.

### הליך הבדיקה

מבצעים וויסות לזרימת הגז - חנקן וחמצן, כדי להבטיח סביבה מתאימה לביצוע הבדיקה. ממקמים את דוגמת הבדיקה במתקן ה-TGA. מבצעים כיוון של קריאת המשקל ל-100% ומתחילים בחימום הדוגמה. סביבת הגז חנקן, חמצן או השילוב בין שניהם נקבע בהתאם לדרישת הפרוק התרמי.

### דוגמת הבדיקה

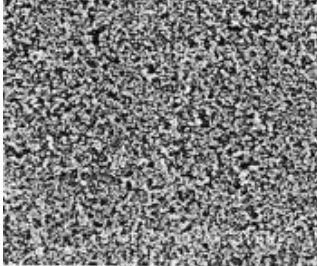
10 עד 15 מיליגרם.

### נתוני הבדיקה

נתוני הבדיקה מתקבלים בצורת גרף של אחוז איבוד המשקל כנגד הטמפרטורה.

## **שם הבדיקה: Carbon black content**

**שיטת הבדיקה:** ASTM D1603, ISO - 6964



בדיקת תכולת פיח באה למדוד את כמות הפיח בחומרים ממשפחת האוליפינים כדוגמת פוליאיתילן או פוליפרופילן, אשר אינם מכילים מלאנים או תוספים לא נדיפים. הבדיקה משמשת לעיתים קרובות בבדיקת בקרת איכות ככלי מדידה עבור פוליאוליפינים שחורים.

### הליך הבדיקה

מניחים דוגמת בדיקה בעלת משקל ידוע בתוך כורית בעלת עמידות לחום גבוהה שמשקלה נמדד מראש. ממקמים את הכורית עם דוגמת הבדיקה בתוך תנור בטמפרטורה של כ - 600 מעלות צלזיוס בסביבת חמצן יבש נקי מחנקן. בסיום שלב החימום מוצאים את הכורית עם משקע השאריות מדוגמת הבדיקה, מקררים את השארית בחנקן טהור ומבצעים שקילה. מכניסים את כורית הבדיקה לתנור הבדיקה לטמפרטורה של כ - 600 מעלות בשנית כדי לחמצן את שאריות הפחמן, כאשר הפחמן מחומצן לגמרי מוצאים את הכורית המבצעים שקילה.

### דוגמת הבדיקה

דוגמת בדיקה במשקל של 1 עד 10 גרם.

### נתוני הבדיקה

$$C = [(W_r - W_o) / W_s] * 100$$

אחוז הפחמן

C – אחוז הפחמן

W<sub>r</sub> – המסה מדוגמת החומר.

W<sub>o</sub> – המסה מהדוגמה לאחר החימום השני.

W<sub>s</sub> – משקל המסה הראשוני.

## בדיקות ריאולוגיות

### שם הבדיקה: Melt Flow Rate

שיטות הבדיקה: ASTM D1238, ISO 1133



MFR בדיקה למדידת שעור הזרימה של חומרים תרמופלסטים דרך מפתח בעל קוטר קבוע בטמפרטורה ועומס קבועים. תוצאת הבדיקה מספקת נתון של זרימת החומר במצב התך אשר יכול לסייע בבחירת סוג החומר (grade) או לתת אינדיקציה לטווח הזרימה, על מנת למנוע מצב של פרוק (הרס) החומר. מצב התחלתי של פרוק החומר יראה תמונה הדומה לזרמיה של חומר בעל משקל מולקולארי מופחת ועשוי להציג תכונות פיסיקליות ירודות.

#### הליך הבדיקה

דוגמים חומר במשקל של כ - 7 גרם בקרוב, החומר מוכנס אל תוך צילינדר הממוקם במתקן הבדיקה בעל גופי חימום המסוגל להביא את החומר למצב של התך. גוף הצילינדר מחומם לטמפרטורה בהתאם לסוג החומר הנבדק, שלב המדידה, ההתך נדחס אל תוך הצילינדר לכיוון פיה הממוקמת התחתית הצילינדר וממנה יוצא החוצה. זמן יציאת החומר נמדד, כמו כן משקל החומר שעבר דרך הפיה. ערך ה - MFR מחושב לפי g/10 min.

#### דוגמת הבדיקה

דגימה של חומר במשקל של לפחות 14 גרם.

#### נתוני הבדיקה

ערך הזרימה = ( משקל החומר שיצא מהפיה X 600/t ) .  
t - משך הבדיקה.  
MFR - g/10 min.

## שם הבדיקה: Capillary Rheometry

שיטת הבדיקה: ASTM D3835, ISO 11443



ראומטר קפילרי משמש לביצוע מדידה גלויה של צמיגות (התנגדות לזרימה) לאורך טווח רחב של קצבי גזירה ובטמפרטורות משתנות הניתנות להשוואה בתנאים המתרחשים בתהליכי הזרקה, קלנדרינג', אקסטרוזיה ותהליכים דומים. לרוב משתמשים בנתוני הבדיקה כדי לקבוע פרמטרים בתהליכי הייצור, עבור בדיקות בקרת איכות, למציאת נקודת ההרס (דגרדציה) בתהליך הייצור, נתון שעשוי למנוע ירידה בתכונות הפיסיקליות של החומר. כמו כן, לקבלת אינדיקציה על היציבות התרמית של החומר.

### הליך הבדיקה

הבדיקה מתבצעת בהתאם לדרישת הלקוח, טמפרטורה, קצב הגזירה ופרמטרים נוספים הניתנים לבחירה בהתאם להגדרות התהליך. קצב הגזירה מתקבל על ידי העברת חומר (פלסטיק) מותך דרך קפילרה (פיה) בטווח כוחות משתנה המביא לתוצאת קצב הגזירה. יציבות תרמית נקבעת על ידי העברת חומר (פלסטיק) מותך דרך קפילרה לאחר תקופת טווחי זמן שהחומר שהה בתוך צילינדר מחומם (אקסטרודר).

### דוגמת הבדיקה

נדרשים לפחות 30 גרם של חומר.

### נתוני הבדיקה

בבדיקת גזירה – מאמץ הגזירה וקצב הגזירה מחושבים מגרף הבדיקה. בבדיקת יציבות תרמית – הצמיגות כנגד זמן השהיה באקסטרודר.

## בדיקות פיסיקליות

### שם הבדיקה: Density & Specific Gravity

שיטת בדיקה: ASTM D792, ISO 1183



צפיפות הנה המסה ליחידת נפח של החומר, משקל הסגולי הנו היחס בין צפיפות החומר לצפיפות המים כאשר המשקל הסגולי של המים ידוע כ- 1 בטמפרטורה של 23 מעלות צלזיוס. המשקל הסגולי והצפיפות בעלי חשיבות ורלוונטיים ממספר בחינות אחת מהם היא משקל החומר לכל קילוגרם הנותנת אינדיקציה לעלות החומר.

#### הליך הבדיקה

קימות שתי שיטות עיקריות לבדיקה, אחת השיטות והנפוצה ביותר לביצוע הבדיקה מתוארת להלן. דוגמת הבדיקה נלקחת מתוך החומר או המוצר, בשלב א' שוקלים את דוגמת הבדיקה באוויר החדר שלב ב' הדוגמה מוכנסת באמצעות חוט ומטבלת בתוף מים מזוקקים הנמצאים בתוך כלי מדידה נדרש לוודא שהדוגמה שקועה באופן מלא. הצפיפות והמשקל הסגולי ניתנים לחישוב

#### דוגמת הבדיקה

כל גודל שניתן למדוד בציוד הבדיקה.

#### נתוני הבדיקה

תוצאות ניתנות לחישוב בהתאם לנתונים הבאים

Specific gravity =  $a / [(a + w) - b]$

a = mass of specimen in air.

b = mass of specimen and sinker (if used) in water.

W = mass of totally immersed sinker if used and partially immersed wire.

## **שם הבדיקה: Bulk Density**

שיטת הבדיקה: ASTM D1895B



צפיפות נפחית מגדירה את המשקל ליחידת נפח של החומר. בדיקת צפיפות נפחית משמשת בעיקר באבקות או בחומר המופיע בצורת גרגירים. הבדיקה מספקת מדידה גסה של גודל חלקיקים והפיזור שלהם אשר יכול לתת אינדיקציה לזרימה עקבית של החומר או בדיקת אימות של כמות חומר באריזה.

### הליך הבדיקה

ממקמים משפך מעל לכוסית המדידה, ומבצעים מילוי של החומר הנמדד מוודאים שהחומר זורם האופן חופשי אל תוך כוסית המדידה. החומר בקצה כוסית המדידה מיושר לגובה שפת הכוסית המדידה בעזרת סרגל. שוקלים את כוסית המדידה את הדוגמא, התוצאה מתקבלת ע"י חלוקה של המשקל לנפח.

### דוגמת הבדיקה

אבקות או חלקיקים.

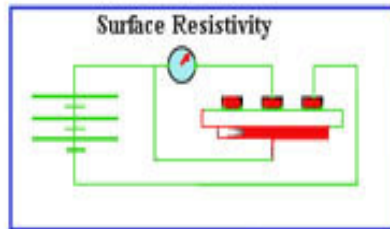
### נתוני הבדיקה

ערך הצפיפות ב -  $\text{g/cm}^3$

## בדיקות חשמליות

### שם הבדיקה: Surface and Volume Resistivity

שיטת הבדיקה: ASTM D257, IEC 600093



Surface Resistivity, מבטא את העמידות להתנגדות חומר למעבר זרם לאורך פני השטח בחומרים הנחשבים כמבודדים. Volume resistivity מבטא את ההתנגדות לחדירת ומעבר זרם דרך החומר. ככל שערך ה- surface/volume resistivity גבוה יותר מעבר הזרם נמוך יותר והחומר מתאפיין במוליכות נמוכה.

#### הליך הבדיקה

ממקמים את דוגמת הבדיקה (דוגמת בדיקה סטנדרטית) בין שתי אלקטרודות. מפעילים מתח למשך 60 שניות ומודדים את ההתנגדות.

#### דוגמת הבדיקה

ניתן להשתמש בכל דוגמה בצורת פלטה מוט צינורית אך קיימת עדיפות לדוגמה ברוחב 4 אינץ'.

#### נתוני הבדיקה

ניתן לחשב את התנגדות בפני השטח ובנפח. עמידות פני השטח מבוטאת באום לשטח מרובע  $\text{Ohms/cm}^2$ . עמידות נפחית מבוטאת ב אום ל – לסנטימטר  $\text{Ohms - cm}$ .



## בדיקות תרמיות

### שם הבדיקה: Differential Scanning Calorimeter - (DSC)

שיטת הבדיקה: ASTM D4317, D3418, E1356, ISO - 11357



DSC משמש למדידת הפרמטרים אשר מסייעים לזיהוי חומרים, הבחנה בין הומופולימר לקופולימר או אפיון חומרים בהתאם לביצועים והיכולות התרמיות, ברוב המקרים בדיקה ב-DSC משמשת למציאת הפרמטרים הבאים:

**Tg** – טמפרטורת מעבר זכוכיתית, הטמפרטורה אשר בה פולימר אמורפי או החלקים האמורפיים בפולימר גבישי הופכים ממצב קשה שביר למצב רך גומי (הטמפרטורה נרשמת במעלות צלזיוס).

**Tm** – טמפרטורת ההתכה, הטמפרטורה בה פולימרים גבישיים הופכים להתך.

**ΔHm** – כמות האנרגיה הנקלטת בזמן התכת הפולימר ביחידות (joules/gram).  
**Tc** – נקודת ההתגבשות, הינה הטמפרטורה בה הפולימר מתחיל בתהליך התגבשות.  
**ΔHc** – כמות האנרגיה המשתחררת במשך ההתגבשות ביחידות (joules/gram).

#### הליך הבדיקה

מכניסים דוגמת בדיקה במשקל 10 עד – 20 מיליגרם אל תוך צלוחית אלומיניום הממוקמת בזמן הבדיקה בתוך מכשיר ה-DSC. דוגמת הבדיקה מחוממת באופן מבוקר בערך של 10 מעלות לדקה. בסיום הבדיקה מתקבל תרשים של זרימת החומר כנגד הטמפרטורה, ערכי הנתונים מתקבלים ע"י אנליזה של התרשים.

#### דוגמת הבדיקה

דוגמה במשקל של 10 עד – 20 מיליגרם.

#### נתוני הבדיקה

Tg, Tm, ΔHm or ΔHc

## שם הבדיקה: Linear Thermal Expansion by TMA or Dilatometer

שיטת הבדיקה: ASTM E831, D696, ISO – 11359



בדיקת התפשטות תרמית ליניארית משמשת למדידת שיעור התפשטות החומר כפונקציה של הטמפרטורה. הבדיקה יכולה לסייע למטרת תכנון ולבחון ייתכנות של כשל בחומר במצב של לחצים תרמיים. הבנת המאפיינים של התכווצות והתפשטות באופן יחסי בשני חומרים המחוברים בניהם עשויה להיות בעלת חשיבות להצלחת האפליקציה.

### הליך הבדיקה

דוגמת הבדיקה ממוקמת בתוך מתקן ה-TMA בטמפרטורת החדר, מבצעים מדידה של גובה ע"י אמצעי מדידה. תא הבדיקה מורם, מכוונים את הטמפרטורה ל-20 מעלות צלזיוס מתחת לטמפרטורה הנמוכה ביותר שנדרשת. דוגמת הבדיקה מחוממת בשיעור קבוע לרוב ב-10 מעלות צלזיוס לדקה מעבר לטווח הטמפרטורה המבוקשת.

אלטרנטיבה לביצוע הבדיקה ע"י מד התפשטות, ממקמים את דוגמת הבדיקה במד ההתפשטות בטמפרטורת החדר, ממקמים מד גובה ומבצעים איפוס. ממקמים את המערכת באמבט עם טווח טמפרטורה משתנה ומודדים את השינוי בדוגמה בטמפרטורה של 30- מעלות צלזיוס ועד 30 מעלות צלזיוס.

### דוגמת הבדיקה

דוגמת הבדיקה עבור TMA, גובה נדרש בין 2 ל-10 מילימטר, רוחב עד 10 מילימטר, קצוות הדוגמה נדרשים להיות שטוחים. דוגמת בדיקה עבור מד התפשטות, רוחב 25.5 מילימטר, אורך 75 מילימטר.

### נתוני הבדיקה

מקדם ההתפשטות מחושב מתוצאות הגרף, בהתאם לנוסחה הבאה:  
$$dL/(dT * L_0) = (CTE)$$

dL – הינו השינוי באורך ב- יחידות ( $\mu m$ ).  
dT – הינו השינוי בטמפרטורה במעלות צלזיוס.  
L<sub>0</sub> – האורך ההתחלתי ביחידת (M).

## **שם הבדיקה:** Thermogravimetric Analysis (TGA)



שיטת הבדיקה: ASTM E1131, ISO 11358

בדיקת ה-TGA באה למדוד את האחוז המשקלי מדוגמת הבדיקה שהולך לאיבוד בזמן חימום דוגמת הבדיקה בשיעור אחיד בסביבה מבוקרת. איבוד משקל הדוגמה בטווח טמפרטורה מוגדר, נותן אינדיקציה למרכיבי הדוגמה כולל מרכיבים נדיפים ומלאנים עצלים. כמו כן, אינדיקציה עבור יציבות תרמית של החומר.

### הליך הבדיקה

מבצעים וויסות לזרימת הגז - חנקן וחמצן, כדי להבטיח סביבה מתאימה לביצוע הבדיקה. ממקמים את דוגמת הבדיקה במתקן ה-TGA. מבצעים כיוון של קריאת המשקל ל-100% ומתחילים בחימום הדוגמה. סביבת הגז חנקן, חמצן או השילוב בין שניהם נקבע בהתאם לדרישת הפרוק התרמי.

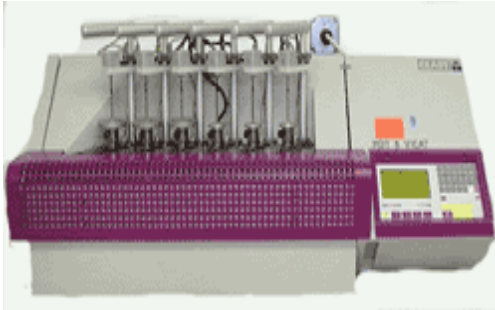
### דוגמת הבדיקה

10 עד 15 מיליגרם.

### נתוני הבדיקה

נתוני הבדיקה מתקבלים בצורת גרף של אחוז איבוד המשקל כנגד הטמפרטורה.

## שיטת הבדיקה: Deflection Temperature Under Load (DTUL OR HDT)



שיטת הבדיקה: ASTM D648, ISO – 75

HDT, מגדיר את הטמפרטורה בה מוט מדידה סטנדרטי עובר שינוי במידותיו במידה מוגדרת תחת עומס. הבדיקה משמשת לקביעת עמידות החומר בחום במשך זמן קצר. הבדיקה נותנת הבחנה בין חומרים המסוגלים לסבול עומס קל בטמפרטורות גבוהות ובין חומרים המאבדים את קשיחות מעבר לטווח טמפרטורות צר.

### הליך הבדיקה

מוט המדידה ממוקם תחת התקן מדידת הסטייה, עומס של 0.45 MPa או 1.80 MPa ממוקם על כל דוגמת בדיקה בהתאמה. מכניסים את דוגמאות הבדיקה אל תחתית אמבט הבדיקה המכיל בתוכו שמן סיליקוני. מעלים את הטמפרטורה בהדרגה בקצב של 2 מעלות צלזיוס לדקה עד לסטייה של 0.25 מילימטר עבור שיטת הבדיקה ASTM ו-0.32 מילימטר עבור שיטת בדיקה ISO דוגמה ישרה ו-0.34 מילימטר עבור דוגמה בעלת פרופיל זוויתית.

### דוגמת הבדיקה

גודל הדוגמה נקבע בהתאם לשיטת הבדיקה:  
ASTM – דוגמת בדיקה סטנדרטית בגודל 5X 0.25X0.25 אינץ'.  
ISO – דוגמה שטוחה, גודל 120mm x 10mm x 4mm.  
ISO – דוגמה זוויתית, גודל 80mm x 10mm x 4mm.

### נתוני הבדיקה

טמפרטורה נתונה בעומס מוגדר וגודל הסטייה.

# סוף