

חומרים פלסטיים: שווקים ומכנולוגיה

מיפוי עולמי

ד"ר רמון יוסף אלבלק

ד"ר שמואל קניג



איגוד יצרני הפלסטיקה
משרד התמס - המדען הראשי
מתיסופ

המכניון - מכון מכנולוגי לישראל
מוסד שמואל נאמן
למחקר מתקדם במדע ובמכנולוגיה



חומרים פלסטיים: שווקים ומכנולוגיה מיפוי עולמי

**ד"ר רמון יוסף אלבלק
ד"ר שמואל קניג**

**פרסום זה מהווה חלק מהמחקר על
חלופות לקידום תעשיית הפלסטיקה והפולימרים בישראל
הנערך ע"י מוסד ע. נאמן עבור איגוד יצרני הפלסטיקה •
משרד התמ"ס - המדען הראשי • מתימו"פ**

מרכז המחקר: ד"ר שמואל קניג

מאי 1992

**Plastic Materials: Markets and Technology
World Mapping**

Dr. Ramon Joseph Albalak

Dr. Shmuel Kenig

הדעות בפרסום זה אינם משקפים בהכרח את עמדתו של מוסד ש. נאמן. המחבר ומוסד
ש. נאמן אינם אחראים להמצאותן האפשרית של טעויות דפוס ו/או אחרות בסקירה זו.

מהדורה ראשונה - אוגוסט 1990

מהדורה שנייה - מאי 1992

**Copyright © 1990. The Samuel Neaman Institute
for Advanced Studies in Science and Technology**

פורסם במאי 1992

מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם

קרית הטכניון, חיפה 32000

חומרים פלסטיים: שווקים וטכנולוגיה - מיפוי עולמי

תקציר מנחלים

מוסד ש. נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה עורך מחקר מקיף על "חלופות לקידום תעשית הפלסטיקה והפולימרים בישראל". העבודה כוללת שלושה שלבים עיקריים:

- א. איסוף נתונים על מצב תעשית הפולימרים והפלסטיקה בארץ ובעולם מבחינה טכנולוגית, שיווקית וכלכלית.
- ב. ניתוח משולב - טכנולוגי, שיווקי וכלכלי - אודות מצבה העתידי של תעשית הפלסטיקה בישראל.
- ג. ניתוח חלופות לתעשית הפלסטיקה והפולימרים בישראל והשלכותיהן על כח-אדם, ארגון התעשיה, מחקר ופיתוח, חמרי גלם, ציוד ומיכון והשקעות.

כחלק מהשלב הראשון בעבודה בוחנת סקירה זו את המצב הנוכחי והמגמות העתידיות בחומרים הפלסטיים השונים, תהליכי עיבוד וציוד, תכנון וייצור תבניות בעזרת מחשב ושילוב מחשבים בייצור. העבודה הנוכחית כוללת היבטים טכנולוגיים ושיווקיים.

התפתחות התעשיה הפלסטית העולמית היא מרשימה ביותר. היצור של חומרים פלסטיים בקנה מידה תעשייתי החל בשנות השלושים עם ייצורם של פולימרים על בסיס סטירן, ויניל כלוריד ואתילן. התפוקה העולמית אז היתה כ-100,000 טונות לשנה. במשך כארבעים שנה גדלה התעשיה באופן משמעותי והכפילה עצמה מדי חמש שנים. 1973 היתה שנת שיא בה יוצרו מעל 40 מיליון טונות חומר פלסטי; כ-90% מכמות זו יוצרו בארה"ב, יפן ומערב אירופה. לאחר מספר שנים של מיתון כמות זו כמעט והוכפלה שוב והגיעה לכ-77 מיליון טונות ב-1986. עם השבחת תכונות הפולימרים הפכו חומרים פלסטיים מתחרים רציניים לחומרים מסורתיים כמו זכוכית ונייר. הופעת פולימרים הנדסיים ובכללם חומרים מרוכבים, נתכים ותערובות הביאה להחלפת מתכות ביישומים שונים. ב-1986 נתכים ותערובות הוו כבר כחמישית משוק החומרים התרמופלסטים, ומאז 1980 קצב החדרת נתכים ותערובות לשוק הוא פי ארבע מזה של פולימרים חדשים. את ההתקדמות הטכנולוגית בתחום החומרים הפלסטיים ניתן לראות בשני מישורים. במישור החומרים החדשים המחליפים חומרים אחרים ואשר זוכים לעתים ליישומים חדשים לחלוטין הודות לתכונות יחודיות של החומר, ובמישור העיבוד שבו תחכום הציוד והפוטנציאל הגלום בתיב"מ וייצור משולב מחשב מאפשרים ייצור מוצרים מורכבים יותר ומתוחכמים יותר.

הצריכה הכלל עולמית של פולימרים היתה בשנת 1989 כ-130 מיליון טונות בערך של כ-200 ביליון דולר. התחזית היא לצריכה עולמית של כ-170 מיליון טונות של חומרים פלסטיים בשנת 2000 עם גידול שנתי ממוצע של 3-4%. לא כל הפולימרים צפויים לגדול באותו קצב. החומרים שחוויה להם הגידול המשמעותי ביותר בצריכה הם החומרים המשתייכים לקבוצת הפולימרים ההנדסיים הניחנים בתכונות כימיות ופיסיקליות משובחות. צריכת פולימרים הנדסיים מהווה כיום כ-2% מסך צריכת כל הפולימרים מבחינה כמותית, ויותר מ-5% מבחינה כספית, אולם קצב הגידול השנתי הממוצע החזוי לצריכת חומרים אלה הוא כ-6-7%. לנתכים ותערובות המהווים תת-קבוצה של פולימרים הנדסיים צפוי קצב גידול שנתי של כ-9-10%, ולפולימרים הנדסיים יחודיים מסוימים כגון פולימרים גבישיים נוזליים (liquid crystal polymers) צפוי קצב גידול שנתי ממוצע של עד 25%. לעומתם, שרפים תרמוסטיים נמצאים עתה בתקופת בגרות כשקצב הגידול השנתי הצפוי עד שנת 2000 הוא פחות מ-2%. ריכוז הצריכה של חומרים אלה בתעשיות בשלות כגון ענף הבניה ומספנות ליצור כלי שיט יתבטא בשינויים בדרישה משנה לשנה ללא עליה כוללת ניכרת בצריכה.

אחד השימושים לפולימרים התרמוסטיים הוא בחומרים מרוכבים. על ידי שילוב בין פולימרים לסיבים ניתן לשפר את החוזק, הצפיפות, הקשיחות והעמידה לתופעות וחילה. מטריצות של שרפים פולימריים משוריינים בסיבי זכוכית מהווים כיום את הקבוצה הגדולה ביותר מבין החומרים המרוכבים הודות לשילוב של תכונות מכניות וכימיות טובות ומחירים הנמוך יחסית. בשנת 1989 יוצרו בארה"ב ובאירופה כ-2.4 מיליון טונות של חומרים מרוכבים שנקלטו במספר גדל והולך של יישומים בענפי הבטחון, ההנדסה, הפנאי והמכוניות המשרדיות בערך כולל של כארבעים ביליון דולר.

הצריכה של חומרים פלסטיים תושפע יותר ויותר מאספקטים אקולוגיים ובריאותיים. בין היתר יוגבר המחזור של חומרים פלסטיים וכן השימוש במוצרים לשימוש קצר או חד-פעמי העשויים מחומר מתכלה. בנוסף, חומרים מסוימים כגון PVC יוגבלו לשימושים מסוימים בגלל רעילותם ו/או פליטת עשן בעת בעירה. גם תהליכי העיבוד יושפעו מתקנות המגבילות את ריכוזם של חומרים רעילים הנפלטים תוך כדי עיבוד.

חומרים פלסטיים מוצאים שימוש במגוון רחב של מגזרי שוק. כ-30% מהצריכה הכוללת של חומרים אלה היא לצרכי אריזה ו-20% נוספים משמשים בענף הבניה. ענף התחבורה (רכב, תעופה וחלל) ויצור מכשירי חשמל/אלקטרוניקה לשימוש ביתי ומשרדי מהווים שני צרכנים גדולים נוספים. שאר הצריכה של חומרים פלסטיים היא למוצרי צריכה, חקלאות, רהיטים, ביגוד, צרכים רפואיים ומוצרים אחרים. צריכת הפולימרים במגזרי השוק השונים אינה הומוגנית; כמויות גדולות של חומרי הצריכה משמשים למגוון רחב

תקציר מנהלים

של שימושים כגון אריזות, צעצועים וצנרת. לעומתם, הפולימרים ההנדסיים היקרים יותר ובעלי התכונות המאפשרות החלפת מתכות משמשים לצרכים מבניים וביצור רכיבים הנחשפים לטמפרטורות גבוהות או לסביבה כימית קורוזיבית. השווקים העיקריים לחומרים אלה, ובכלל זה נתכים ותערובות וכן חומרים מרוכבים, הם תעשיית הרכב, התעשייה האווירית (aerospace) וענף מכשירי החשמל/אלקטרוניקה לשימוש ביתי ומשרדי. כמויות גדולות של חומרים מרוכבים משמשים גם את ענף הבניה. פולימרים אחרים בעלי תכונות חשמליות או אופטיות מיוחדות משמשים במגזרי שוק צרים (niches).

לאורך השנים פותחו מספר רב של שיטות לעיבודם ולעיבובם של חומרים פולימריים למוצר סופי. על פי רוב תהליכים שונים משמשים לעיבודם של פולימרים תרמופלסטיים, תרמוסטטיים וחומרים משוריינים. תהליכי העיבוד הנפוצים ביותר הם הזרקה (לסוגיה השונים), אקסטרוזיה, עיצוב בניפוח ועיצוב תרמי. לענף ציוד עיבוד פולימרים צפויה התפתחות דינמית עד שנת 2000 שמקורה הן בשיפורים שיעשו בציוד קיים, והן בתכנון ובנית מכונות עיבוד חדשות. הכח הדוחף להתפתחות זו יהיה שיפור הכלכליות של עיבוד חומרים פלסטיים וכן הוצרתם של שווקים חדשים לחומרים אלה כתוצאה מהמרת חומרים אחרים. תהליכי העיבוד והציוד המשמש בתהליכים הולכים ומשתפרים הודות לשילובן של מערכות בקרה ממוחשבות על בסיס מיקרופרוססורים ואמצעי חישה. שימוש מוגבר באוטומציה, תיב"מ ורובוטיקה, וציוד עזר משופר. עבור המוצרים החדשים המתפתחים יפותח ציוד דור ראשון (first generation machinery). עם הגברת החדירה לשוק, יפתחו יצרני ציוד גירסאות משופרות שתתבטאנה במכונות דור שני ושלישי. תופעה זו היא תהליך מתמשך, והיא עדיין מתרחשת כיום בציוד שפותח לפני עשרות שנים.

ייצור משולב מחשב (CIM) הולך ונכנס לתעשיית הפלסטיקה כשהכווץ הדוחף הוא הצורך בהעלאת הפרייון, העלאת האיכות והקטנת מלאים. במערכות CIM מתקדמות קיים קשר מחשבי עם מערכות התיב"ם, בסיס הנתונים הניהולי וניהול החשבונות. מגמה זו תלך ותגבר ותגרום למהפך בתעשיית הפלסטיקה.

עמוד

פרק 1:	חומרי צריכה (commodities)	1
	פוליאתילן (PE)	1
	LDPE/LLDPE	1
	HDPE	4
	פוליפרופילן (PP)	7
	פוליווילכלוריד (PVC)	10
	פוליסטירן (PS)	14
	פוליאתילן טראפאלאט (PET)	18
פרק 2:	פולימרים הנדסיים (engineering polymers)	24
	אקרילוניטריל-בוטדיאן-סטירן (ABS) וסטירן אקרילוניטריל (SAN)	30
	נילון (PA)	33
	פוליקרבונט (PC)	35
	פוליאצטל (POM)	36
	פוליאסטר תרמופלסטי (PET/PBT)	37
	פולימרים הנדסיים יחודיים (specialities)	39
פרק 3:	נתכים ותערובות (alloys and blends)	43
פרק 4:	פולימרים תרמוסטיים (thermosets)	63
	אפוקסי	63
	פנליים	64
	מלמין ואוריאה	65
	פוליאסטר בלתי-רווי	66
	פוליאוריתן	67
פרק 5:	חומרים מרוכבים	71
	חומרים מרוכבים מתקדמים	75
פרק 6:	חומרים חדשים	82
	פולימרי גביש נוזלי (LCPs)	82

עמוד	
84	פולימרים לאופטיקה לא-לינארית (NLOs)
86	פולימרים מוליכים
87	רשתות פולימר משתלבות (IPNs)
89	פולימרי פלסמה (plasma polymers)
92	פרק 7: טכנולוגית עיבוד
92	חזרקה לתבניות
95	שיחול
97	עיצוב בניפוח
100	עיצוב בחום
102	עיצוב של לוחות תרמופלסטים משורייני זכוכית
104	עיצוב תרכובי יריעה
105	עיצוב שרפים בהעברה (RTM)
106	עיצוב ע"י hand lay-up
106	עיצוב בהתזה (spray-up)
107	שק ואקום (vacuum bag)
107	מיכלי לחץ (autoclaves)
107	פולטרוזיה (pultrusion)
108	ליפוף סיבים (filament winding)
108	תרכוב (compounding)
111	תרכוב ראקטיבי (reactive compounding)
114	פרק 8: מכונות וציוד לעיבוד פולימרים
121	ציוד עזר
124	פרק 9: תיבי"מ (CAD/CAM)

ABS	Acrylonitrile-butadiene-styrene
APE	Aromatic polyester
CAD/CAM	Computer aided design/Computer aided manufacturing
EMI	Electromagnetic interference
EPDM	Ethylene propylene diene monomer
FDA	U.S. Food and drug administration
GNP	Gross national product
HDPE	High density polyethylene
HIPS	High impact polystyrene
LCP	Liquid crystal polymer
LDPE	Low density polyethylene
ILDPE	Linear low density polyethylene
NLO	Non-linear optics
PA	Polyamide
PAI	Polyamideimide
PBT	Polybutylene terephthalate
PC	Polycarbonate
PEEK	Polyetheretherketone
PEI	Polyetherimide
PES	Polyethersulphone
PET	Polyethylene terephthalate
POM	Polyacetals
PP	Polypropylene
PPE	Polyphenylene ether
PPS	Polyphenylene sulphide
PS	Polystyrene
PSU	Polysulphone
PVC	Polyvinyl chloride
RIM	Reactive injection molding
RTM	Resin transfer molding
SAN	Styrene acrylonitrile
SMC	Sheet molding compound
SPI	Society of the plastics industry
T_g	Glass transition temperature

פרק 1: חומרי צריכה (commodities)

מתוך המגוון הרחב של חומרים פלסטיים, ישנם מספר חומרי יסוד שצריכתם גבוהה במיוחד, הן בצורתם הבסיסית והן כשרפי בסיס לנתכים, תערובות וחומרים מרוכבים. פולימרים אלה נקראים חומרי צריכה (commodities) ומקובל לכלול ביניהם פוליאטילן (PE), פוליפרופילן (PP), פוליסטירן (PS), פוליונילכלוריד (PVC) וכן פוליאטילן טראפאלאט (PET) [1].

פוליאטילן - פוליאטילן הוא הפולימר הנצרך ביותר ומהווה שליש מהצריכה הכוללת של חומרים פלסטיים בארה"ב ב-1985 ו-40% מצריכת החומרים התרמופלסטיים. זהו הפלסטיק הזול ביותר, ותכונותיו בצרוף קלות העיבוד שלו הביאו אותו לשימוש במגוון שוק רבים. חלק ניכר מהגידול בצריכת PE בא על חשבון חומרים מסורתיים כמו זכוכית ונייר. מוערך כי המתקנים הקיימים כיום לייצור אתילן, שהוא חומר הגלם לייצור פוליאטילן, יכולים לספק את הדרישה לכל היותר עד אמצע שנות התשעים. מעבר לזה יידרשו מתקנים נוספים.

LDPE/LLDPE - השוק הגדול ביותר ל-LDPE/LLDPE הוא אריזה, ובעיקר יריעות (film). שימושים אופייניים הם אריזת לחם ובשר, שקיות אשפה ואריזות למוצרים. רוב השווקים הנ"ל הגיעו לבגרות ויגדלו עם גידול האוכלוסיה או התוצר הלאומי (GNP). יתרחב השימוש ביריעות דקות יותר וחזקות יותר עשויות LLDPE. היכולת לייצר יריעות דקות וחזקות יפתח ל-LDPE שווקים חדשים כתחליף לנייר Kraft המשמש לשקיות במרכולים בארה"ב וכן כחומר לייצור שקי משלוח (shipping sacks) הזוכים לשחיקה רבה. כמות הפוליאטילן ששמשה לייצור שקיות למרכולים הוותה פחות מ-4% מהשוק ב-1980. ב-1986 עלה ערך זה ל-25%, כשל-LDPE 60% מחלק השוק של פוליאטילן. בנוסף לשימוש כיריעות, LDPE משמש גם כשכבת ציפוי לקרטוני חלב, יריעות מחומרים אחרים ולאריזות סטריליות. שווקים אחרים ל-LDPE/LLDPE כוללים בידוד לחוטי חשמל וכבלים, כלי בית המיוצרים בהזרקה, צעצועים, מיכלי איחסון וצנרת גמישה. אולם, מאחר ורבים מהשווקים הגיעו לרוויה, הגידול בצריכה בשנים 1985 - 2000 צפוי להיות קטנה מזו שבתקופה 1975 - 1985 [1].

טבלה 1 מסכמת את הצריכה של LDPE/LLDPE באירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. הטבלה מתיחסת באירופה לצריכה בארצות השוק האירופאי המשותף וכן אוסטריה, פינלנד, נורווגיה, שוודיה ושווייץ.

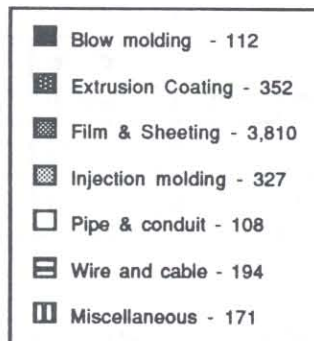
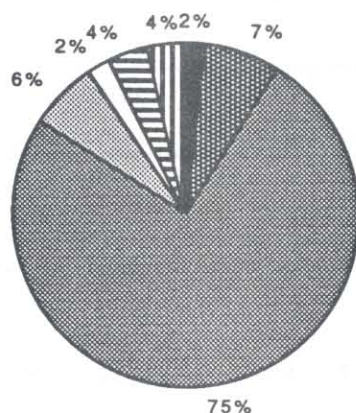
צריכה באלפי טונות						
יפן		ארה"ב		אירופה		השימוש
1989	1988	1989	1988	1989	1988	
52	46	41	35	112	112	ניפוח
-	-	332	350	352	339	ציפוי באקסטרוזיה
611	608	2,668	2,869	3,810	3,740	יריעות
102	93	396	345	327	319	הזרקת
17	16	61	55	108	104	צנרת
76	70	180	176	194	191	חוטי חשמל וכבלים
236	223	-	-	-	-	טיפול בנייר
-	-	112	117	-	-	rotomolding
200	159	620	623	171	174	שונות
1,294	1,216	4,410	4,570	5,074	4,979	סה"כ
96	65	428	412	-	-	יצוא
1,390	1,281	4,838	4,982	5,074	4,979	סה"כ כללי

טבלה 1. השימוש ב-LDPE/LLDPE במערב אירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,3,4].

הצריכה המערב אירופאית של כל החומרים הפלסטיים היתה גבוהה ב-1989 מאשר ב-1988. אולם, צריכת LDPE ו-LLDPE עלתה ב-1.9% בלבד בתקופה זו, וזאת לעומת העליה של 6% שנה קודם לכן [2,5]. נתון זה הושפע מהמרת LDPE ב-LLDPE ביישומים שונים. אם כי במקביל התרחב השימוש ב-LDPE לתחומים חדשים כגון ציפויים באקסטרוזיה (extrusion coating) וחיתולים [2]. בארה"ב ירדה הצריכה בין 1988 ל-1989 בכ-3.5%, וזאת לעומת עליה של 6.5% בצריכת LDPE/LLDPE ביפן. ישנם גם דווחים על עליה מרשימה של 14.3% בצריכת LDPE/LLDPE ביפן [6].

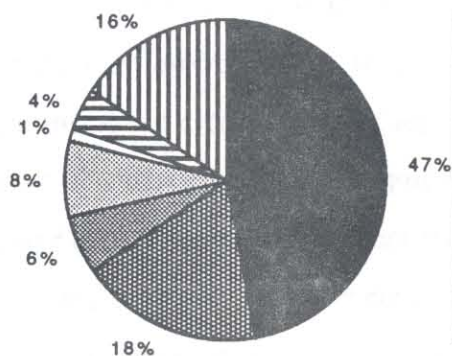
הייצור של LDPE בטאיון ב-1986 היה 209,000 טונות (26,000 טונות ליצוא), 200,000 טונות ב-1987 (22,000 טונות ליצוא), ו-205,000 טונות ב-1988 (14,000 טונות ליצוא) [7]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 493,000 טונות LDPE/LLDPE, כשמוזה 327,000 טונות יידרשו בשוק המקומי [8]. ריכוז נתוני ייצור וצריכת LDPE/LLDPE ושאר חומרי הצריכה ב-1988 ב-22 מדינות מובא בהמשך בטבלה 14.

Western Europe



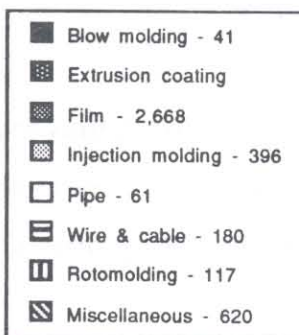
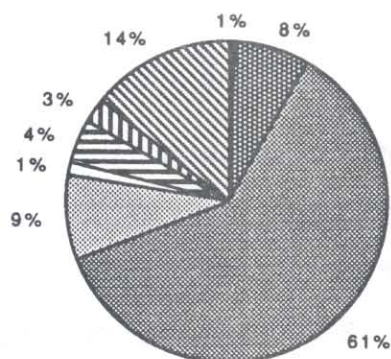
Total - 5,074,000 tons

Japan



Total - 1,294,000 tons

USA



Total - 4,410,000 tons

צפוי שהצריכה של LDPE/LLDPE בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-5,380,000 טונות והיצוא של חומרים אלה מתוך ארה"ב יגיע ל-568,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר
113	182	306	232	32	23	3,814	20	658
6%*	8%*	12%	14%*	-	5%	37%	7%*	29%*

טבלה 2: צריכת LDPE/LLDPE באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר שמהווה השימוש ב-LDPE/LLDPE (* - כולל HDPE) [1].

HDPE - פוטנציאל הגידול של HDPE עולה על זה של LDPE/LLDPE הודות למספר יישומים חדשים בעלי נתוני גידול מבטיחים. אריזה מהווה את המגזר הגדול ביותר, כאשר השימוש העיקרי הוא לניפוח בקבוקים ולייצור מיכלים בהורקה. שווקים אלה עדיין מציעים אפשרויות להחלפת חומרים מסורתיים. שימושים אחרים כוללים בקבוקים לשמן מנוע, מיכלים למוצרי חלב, מיכלים לצבע, וחביות. פוטנציאל הגידול של HDPE כתחליף לנייר בשקיות שונות מתבטא בעשרות אחוזים. לצורך כך פותח HDPE בעל משקל מולקולרי גבוה (HMW). שימושים נוספים ל-HDPE הם לצעצועים, כלי בית, צנרת גז ומים, צנרת חקלאית, ארזים ומיכלים. שימוש הנמצא בהאצה הוא למיכלי בנזין למכוניות (לאחר טיפול שטח מתאים). ההערכה היא כי עד אמצע שנות התשעים מגזר זה יצרוך 45,000 טונות HDPE לשנה [1].

טבלה 3 מסכמת את הצריכה של HDPE באירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. הטבלה מתייחסת באירופה לצריכה בארצות השוק האירופאי המשותף וכן אוסטרליה, פינלנד, נורווגיה, שוודיה ושווייץ.

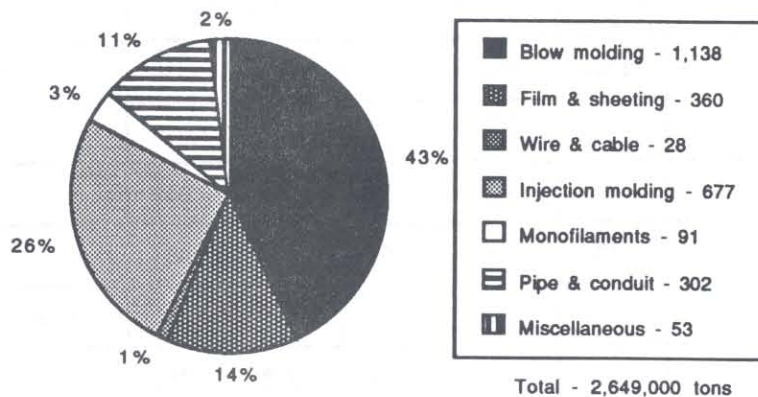
בחודש אוקטובר 1989 ארע הפיצוץ במתקני חברת Philips בטקסס. מעריכים כי נפגעו כ-20% מאמצעי הייצור של HDPE בארה"ב, אם כי פגיעה זו תאוזן בקרוב ע"י בנית מתקנים חדשים [3]. באירופה צפויה בשנים הקרובות עליה שנתית ממוצעת של כ-6% בצריכת HDPE שתתאפשר ע"י פריצת צווארי בקבוק במתקני הייצור (debottlenecking) [5].

צריכה באלפי טונות						
יפן		ארה"ב		אירופה		
1989	1988	1989	1988	1989	1988	חשימוש
139	133	1,337	1,365	1,138	1,088	ניפוח
303	292	456	432	360	347	יריעות
143	133	700	754	677	683	הזרקת
-	-	-	-	91	88	monofilaments
57	42	224	245	302	284	צנרת
-	-	66	57	28	25	חוטי חשמל וכבלים
43	39	-	-	-	-	סיבים
72	47	-	-	-	-	flat yarn
-	-	55	59	-	-	rotomolding
124	122	476	528	53	51	שנות
881	809	3,314	3,383	2,649	2,566	סה"כ
132	110	378	295	-	-	יצוא
1,013	919	3,692	3,678	2,649	2,566	סה"כ כללי

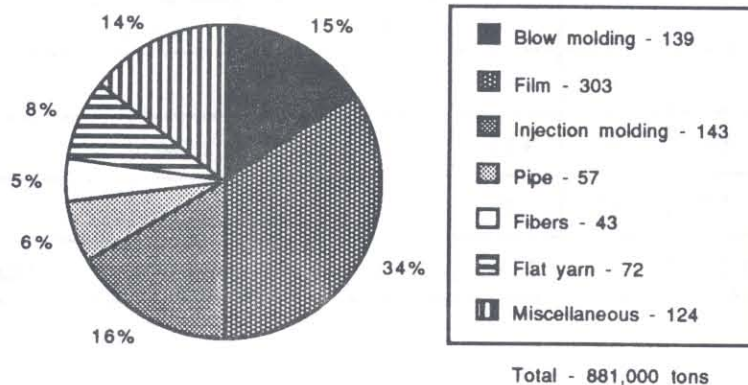
טבלה 3: השימוש ב-HDPE במערב אירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,3,4].

הייצור של HDPE בטאיון ב-1986 היה 191,000 טונות (29,000 טונות ליצוא), 175,000 טונות בשנת 1987 (7,000 טונות ליצוא), ו-185,000 טונות ב-1988 (3,000 טונות ליצוא) [7]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 315,000 טונות HDPE, שידרשו כולם בשוק המקומי [8].

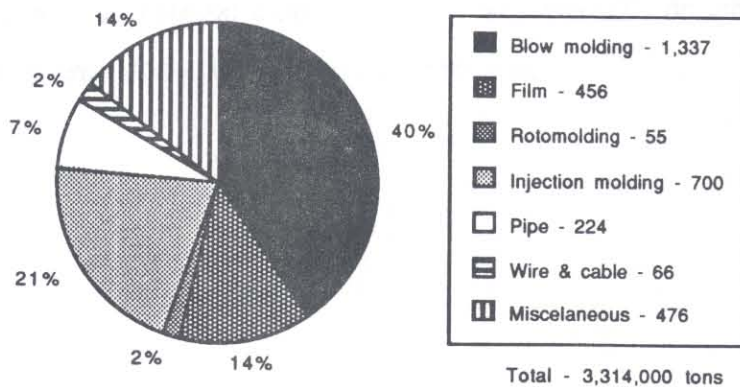
Western Europe



Japan



USA



צריכת HDPE ב-1989 באלפי טונות

צפוי שהצריכה של HDPE בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-4,599,000 טונות והיצוא של חומר זה מתוך

ארה"ב יגיע ל-454,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר
-	409	318	93	45	82	2,996	111	545
6%*	8%*	12%	14%*	-	19%	29%	7%*	29%*

טבלה 4: צריכת HDPE באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר

שמהווה השימוש ב-HDPE (* - כולל LDPE/LLDPE) [1].

פלסטיק - לפוליפרופילן חזוי אחד מקצבי גידול הדרישה הגבוהים ביותר מבין כל החומרים הפלסטיים. גידול זה עתיד לנבוע הן מיישומים חדשים והן ממגזרי שוק מסורתיים. בתעשיית הרכב משמש PP לחלקים בתא המנוע (מאורר, מגש המצבר, רכיבים מכניים) ולחלקים פנימיים ברכב. לאחרונה מתרבה השימוש בתערובות על בסיס PP, ובעיקר PP/EPDM לייצור פגושים. חידוש זה התאפשר עקב הורדת תקני נזק הנגיפה מ-5.0 ל-2.5 mile/hr. כל יצרני הרכב ביפן משתמשים בתערובות זו לייצור פגושים. בנוסף, חברות יפניות בוחנות את האפשרות ליצר את שידת המכוניים מ-PP, כתחליף לחומרים יקרים יותר. מאחר וחברות יפניות רבות החלו לאחרונה ליצר כלי רכב בארה"ב, צפוי שמגמה זו תאומץ גם ע"י יצרנים אמריקאים [1]. PP משמש כבסיס לתערובות קו-פולימרים ותרכובים מגוונים המשמשים בתעשיית הרכב [9]. לחומרים על בסיס PP היכולת להתחרות הן במתכות והן בפולימרים הנדסיים יקרים מבחינת שילוב התכונות והמחיר [10]. דוגמא לשימוש נרחב ב-PP בתעשיית הרכב הוא ב-Tipo של חברת Fiat [5].

ייצור סיבים וחוטים מהווה אחד השימושים העיקריים ב-PP, כשרוב הצריכה היא לשטיחים וריפוד הכלולים בענף הריהוט. גידול נוסף בצריכת PP צפויה משימושו ליריעות בענף הבניה, חיתולים חד-פעמיים, ביגוד ספורט והנעלה. קיימת גם האפשרות שפוליפרופילן יחליף צלולוז אצטט בייצור פילטרים לסיגריות. שימושים באריזה כוללים יריעות, בעיקר כשדרושה שקיפות טובה, וניפוח בקבוקים. מוצרי צריכה המשתמשים ב-PP כוללים צעצועים, כלי בית, אביזרים רפואיים חד-פעמיים, תיקים ומוזודות. פרט לאביזרים רפואיים, השימוש של PP לייצור מוצרים אלה צפוי להיות מוגבל ע"י תחרות של פולימרים אחרים, בעיקר פוליאטילן הצפוי להיות זול יותר. ייתכן שפוליפרופילן יחליף PVC כחומר לייצור שקיות דם ואינפוזיה. שוק מכשירי החשמל צופה אפשרויות להחלפת מתכות ע"י PP בעיקר במקררים ומדיחי כלים [1].

אספקת PP צפויה להיות מוגבלת בטווח הקצר, אולם הודות לזמינות הגבוהה של המונומר פרופילן

בארה"ב, צפויות בשנות התשעים מדי פעם הרחבות במתקני הייצור של PP.

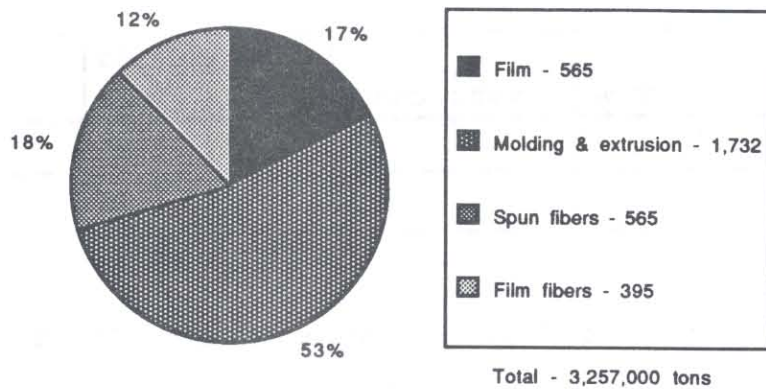
צריכה באלפי טונות						
יפן		ארה"ב		אירופה		
1989	1988	1989	1988	1989	1988	השימוש
33	30	58	60	-	-	ניפוח
387	369	337	324	565	492	יריעות
906	817	844	776	1,732*	1,595*	הזרקה
166	152	79	79	*	*	אקסטרוזיה
51	45	882	841	565	518	סיבים
85	82	-	-	395	374	סיבים שטוחים
53	50	605	606	-	-	שונות
1,681	1,546	2,805	2,686	3,257	2,979	סה"כ
60	65	496	537	-	-	יצוא
1,741	1,611	3,301	3,223	3,257	2,979	סה"כ כללי

טבלה 5: השימוש ב-PP במערב אירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 * - באירופה חנתון

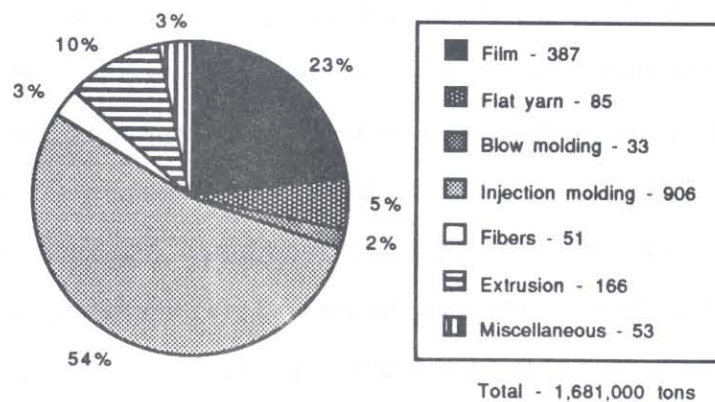
הוא עבור הזרקה ואקסטרוזיה יחדיו [2,3,4].

שעור הגידול הגבוה ביותר בצריכת פולימרים באירופה בין השנים 1988 ו-1989 היה בצריכת PP שצריכתו עלתה ב-9.3% מ-2,979,000 טונות ל-3,257,000 טונות [2], אם כי נתון זה פחות מרשים מהגידול בצריכה שנה קודם לכן שהיה בן 14% [5]. הייצור של PP בטאיון ב-1986 היה 214,000 טונות (19,000 טונות ליצוא), 211,000 טונות בשנת 1987 (400 טונות ליצוא), ו-224,000 טונות ב-1988 (100 טונות ליצוא) [7]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 357,000 טונות PP, שמתוכם 314,000 טונות יידרשו בשוק המקומי [8].

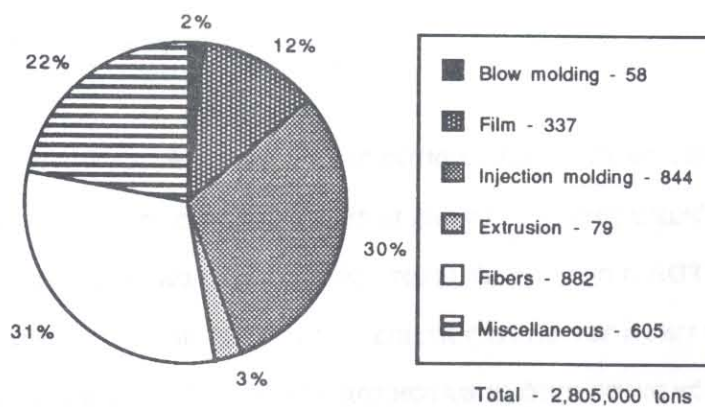
Western Europe



Japan



USA



צריכת PP ב-1989 באלפי טונות

צפוי שהצריכה של PP בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-3,891,000 טונות והיצוא של חומר זה מתוך

ארה"ב יגיע ל-499,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר
14	32	431	272	953	11	1,044	316	817
-	-	17%	12%	51%	-	10%	16%	19%

טבלה 16: צריכת PP באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר

שמהווה השימוש ב-PP [1].

פולימרים - רוב צריכת ה-PVC הוא לענף הבניה, כשכ-40% משמשים לצנרת ו-20% נוספים משמשים לחלונות, משטחי ציפוי, חוטי חשמל וכבלים. שאר ה-40% משמשים לאריזה, הנעלה, ריחוט ומכשירי חשמל. חלוקה זו של השוק צפויה להמשיך אל תוך המאה הבאה, עם אפשרות לגידול של חלקו של ענף הבניה בצריכת PVC. צריכה עתידית תאופין ע"י סוגים (grades) חדשים של PVC לשימושים מיוחדים במגזרי הרפואה, האלקטרוניקה ואריזות המזון. רוב הסוגים החדשים יהיו תרכובים, תערובות ונתכים בעלי עמידות גבוהה יותר לטמפרטורה, חוזק נגיפה גבוה, תכולת מונומר (VCM) נמוכה ושקיפות משופרת. מוצרים אלה יעלו את הרווח השולי ביחס ליישומים מסורתיים שלהם רווח שולי נמוך. הצריכה למוצרים מסוימים - חלונות, משטחי ציפוי, צנרת בקוטר גדול ובקבוקים - צפויה לגדול לפחות פי שניים מסך כל שוק ה-PVC [1]. חברת Goodrich שמה לה למטרה להגביר את השימוש ב-PVC כפולימר הנדסי כתחליף למתכות וחומרים פלסטיים יקרים יותר. בין היתר מדובר ביכולת משופרת לעצב בניפוח חלקים גדולים ומורכבים, ייצור חומר מרוכב על בסיס PVC המונע מעבר חמצן (מיועד לאריזות מזון), ועיצוב בואקום של צמדי יריעות (twin-sheet vacuum-forming) [11].

ל-PVC היסטוריה עגומה של גרימת נזק עקב פליטת כמויות גדולות של עשן רעיל משריפת צנרת בזמן התלקחות בתי מגורים ובתי מלון. במדינות אחדות בארה"ב נעשה ניסיון להגביל את השימוש ב-PVC ופלסטיקים אחרים בענף הבניה, אם כי לא צפויה לכך הצלחה. לאחרונה דחה ה-FDA הצעה לאסור שימוש ב-PVC לצרכי מזון ומשקה, והמיר את האיסור המוצע בהגבלת ריכוז המונומר השארי ל-5 ppb. צפויים עתה דיונים להגבלת שריפת פסולת PVC. לתוצאות דיונים אלה עשויה להיות השפעה על צריכת PVC לאריזה בארה"ב.

יצרני PVC נהנים עתה מתקופת יציבות במחירים, ניצול מלא של אמצעי הייצור ורווחיות גבוהה. זהו שיפור ניכר לעומת המיתון בשנים 1981-1982 שבהם ניצול חלקי של אמצעי הייצור ורווחיות נמוכה אילצו את סגירתם של מפעלים אחדים. התחזית היא שדרישת ה-PVC תתקרב ליכולת הייצור הנוכחית, אולם הרחבת המתקנים הקיימים תעשה באיטיות למנוע השנות עודפים. עם התחזקות מטבעות זרים ביחס לדולר האמריקאי צפוי שהיבוא לארה"ב יקטן וליצרנים האמריקאים יתאפשר להתחרות ביתר קלות בשוק העולמי [1].

טבלה 7 מסכמת את הצריכה של PVC בארה"ב בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. עקב חלוקת הנתונים לפי קטגוריות שונות הנתונים עבור ארה"ב מובאים בטבלה נפרדת.

צריכה באלפי טונות		
1989	1988	השימוש
444	410	קלנדריה
2,395	2,528	אקסטרוזיה
182	193	הזרקה
91	90	dispersion molding
169	176	dispersion coating
3,388	3,509	סה"כ
365	235	יצוא
3,753	3,744	סה"כ כללי

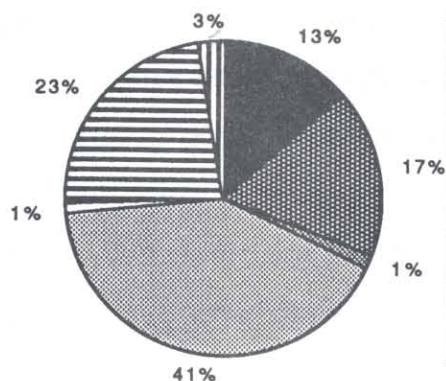
טבלה 7: השימוש ב-PVC בארה"ב בשנים 1988 ו-1989 [3].

טבלה 8 מסכמת את הצריכה של PVC קשיח וגמיש באירופה, קנדה ויפן בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. הטבלה מתייחסת באירופה לצריכה בארצות השוק האירופאי המשותף וכן אוסטריה, פינלנד, נורווגיה, שוודיה ושווייץ.

צריכה באלפי טונות						
יפן		קנדה		אירופה		השימוש
1989	1988	1989	1988	1989	1988	
-	-	-	-	441	428	בקבוקים
-	-	-	-	570	557	יריעות
-	-	-	-	39	37	הזרקה
-	-	143	149	1,350	1,309	צנרת
-	-	97	97	757	713	פרופילים באקסטרוזיה
-	-	3	3	40	45	תקליטים
-	-	11	14	88	85	שנות
1,000	937	254	263	3,285	3,174	סחי PVC קשיח
-	-	-	-	202	190	ציפוי בדים
-	-	36	41	378	372	יריעות
-	-	17	18	272	267	ריצוף
-	-	-	-	192	186	צנרת גמישה
-	-	28	31	436	431	חוטי חשמל וכבלים
-	-	33	35	259	250	שנות
549	508	114	125	1,739	1,696	סחי PVC גמיש
298	287	-	-	44	42	אחר
1,847	1,732	368	388	5,068	4,912	סחי
60	52	11	12	-	-	יצוא
1,907	1,784	379	400	5,068	4,912	סחי כללי

טבלה 8: השימוש ב-PVC במערב אירופה, קנדה ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,4,12].

Western Europe

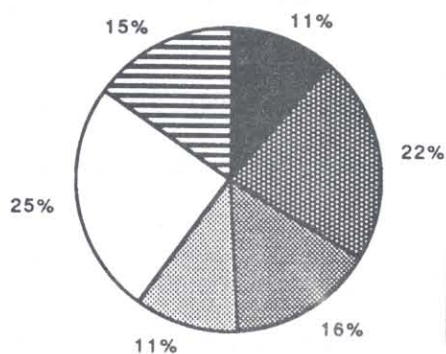


Rigid PVC

- Bottles - 441
- Film & sheet - 570
- Injection molding - 39
- Pipe & conduit - 1,350
- Records - 40
- Profile extrusion - 757
- Miscellaneous - 88

Total - 3,285,000 tons

Western Europe

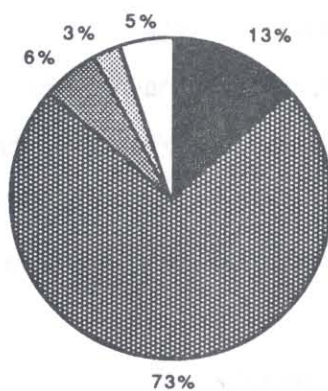


Plasticized PVC

- Coated fabrics - 202
- Film & sheet - 378
- Flooring - 272
- Profiles - 192
- Wire & cable - 436
- Miscellaneous - 259

Total - 1,739,000 tons

USA



- Calendering - 444
- Extrusion - 2,395
- Injection molding - 182
- Dispersion molding - 91
- Dispersion coating - 169

Total - 3,388,000 tons

צריכת PVC ב-1989 באלפי טונות

שעור הגידול בצריכת PVC באירופה בין השנים 1988 ו-1989 היה עלה ב-3.2% מ-4,912,000 טונות ל-5,068,000 טונות [2]. ערכו של נתון זה כמחצית מהגידול בצריכה שנה קודם לכן שהיה בן 6.5% [5]. הייצור של PVC בטאיון ב-1986 היה 724,000 טונות (22,000 טונות ליצוא), 773,000 טונות בשנת 1987 (7,000 טונות ליצוא), ו-791,000 טונות ב-1988 (7,000 טונות ליצוא) [7]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 1,049,000 טונות PVC, שמתוכם 1,307,000 טונות יידרשו בשוק המקומי [8].

צפוי שהצריכה של PVC בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-4,728,000 טונות והיצוא של חומר זה מתוך ארה"ב יגיע ל-159,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר
68	3,178	182	364	216	20	352	77	272
-	47%	7%	16%	12%	-	3%	4%	6%

טבלה 9: צריכת PVC באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר שמהווה השימוש ב-PVC [1].

המגמה החזויה היא התעצמות השוק ל-PVC קשיח על פני PVC גמיש. בשנת 1988 יותר מ-60% מהייצור באירופה היה לחומר קשיח. השימוש ב-PVC גמיש ירד במגזרי ההנעלה והכבלים אך זכה לשימוש ניכר בציפוי קירות וריצוף [5].

פוליסטירן - הדרישה לפוליסטירן הכפילה את עצמה בתקופה 1970-1985, אם כי רוב הגידול חל במחצית הראשונה של התקופה. באמצע שנות השמונים היתה הדרישה לפוליסטירן סטטית עקב תחרות מחומרים אחרים כדוגמאת פוליפרופילן, וכן בגלל התבגרותם של מגזרי שוק מסוימים. לאחרונה התרבו השווקים הפוטנציאליים ל-PS: חלקים בדלתות מקרר (כתחליף ל-ABS), אריזות חד-פעמיות למזון מהיר, כיסויים לתקליטורים (compact discs) וגופי מחשבים ושאר מכונות משרדיות [1]. שנת 1988 היתה שנת שיא בגידול השנתי של PS מאז תחילת שנות השבעים והדרישה במערב אירופה עלתה ב-8% [5].

מתגברת המורכבות של עסקי הפוליסטירן, והסווג המקובל לחומר לשימוש כללי (GP) ולחומר בעל חוזק נגיפה גבוה (HIPS) דורש תת-חלוקה נוספת. סוגי ה-GP PS נחלקים לכאלה המתאימים להזרקה

ואקסטרוזיה, לסוג המיועד ליריעות מכוונות (OPS) ולפוליסטירן תופח המיועד לקצפים. פוליסטירן בעל חוזק גיפה גבוה מתחלק לדרגות חוזק עולות לפי MIPS (medium impact), HIPS (high impact) ו-SHIPS (super-high impact).

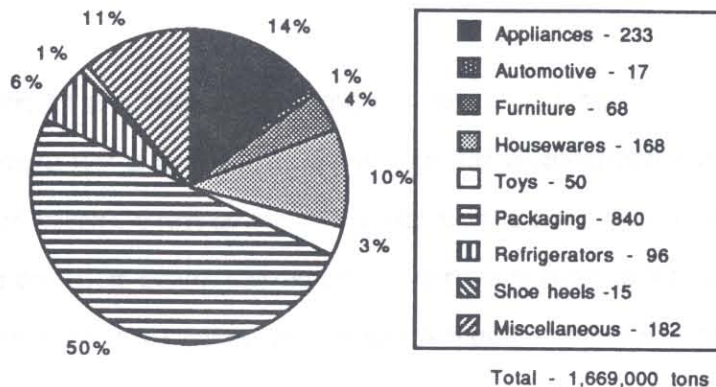
כ-50% מצריכת PS היא לאקסטרוזיה והזרקה של מוצרים כמו כוסות, מיכלים, מוצרי ספורט ומסגרות לתמונות. סוגים אחרים בעלי עמידות תרמית טובה יותר משמשים לסלילי סרט מחשב, קלטות אודאו ווידאו ומכשור מעבדתי. יריעות פוליסטירן מכוונות משמשות בעיקר לאריות מזון ולמגשים. קצפי פוליסטירן משמשים לכוסות חד-פעמיות למשקאות חמים, קרטוני ביצים, אריות חד-פעמיות למזון מהיר, בידוד ואריות למוצרי צריכה. HIPS משמש כאשר יש דרישה לרמה גבוהה יותר של בטיחות וכן למוצרים הזוכים לשחיקה רבה. דוגמאות למוצרים העשויים HIPS הם גופי טלוויזיות ומוצרי חשמל אחרים, צעצועים, עקבים לנעליים, מיכלים ורהיטים. ייצור מקלדות מחשב מהווה שוק פוטנציאלי רחב ל-HIPS, וחברת Commodore משתמשת בו לצורך זה [1].

עקב הדרישה הגוברת לפוליסטירן הודיעו מספר יצרנים על כוונותיהם להרחיב את אמצעי הייצור, צפוי שהמתקנים המספקים כיום את מונומר הסטירן יספיקו למלא את הדרישה גם לאחר עליה בייצור הפולימר. בעקבות התגברות היצוא מארה"ב צפוי שהרחבת מתקני ייצור ה-PS תחל לפני 1993 [1].

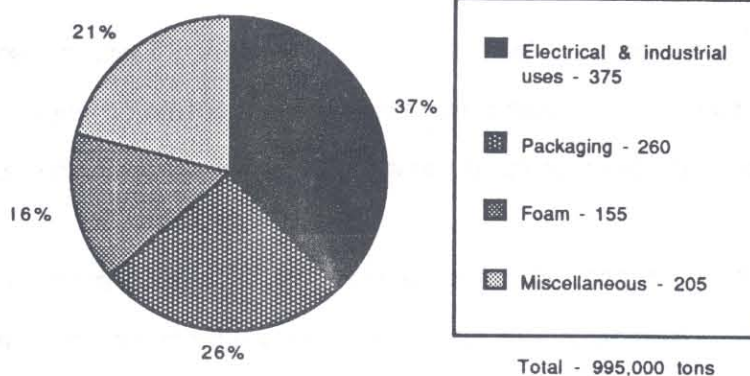
היצוא מאירופה פחת בשנת 1988 על מנת לספק את הדרישות בתוך היבשת שעלו בגלל ירידה של 50,000 טונות ביבוא מדרום אמריקה והגוש המזרחי שהעדיפו ליצא למזרח הרחוק תמורת מחירים גבוהים יותר [5]. הייצור של PS בטאיון ב-1986 היה 206,000 טונות (21,000 טונות ליצוא), 234,000 טונות בשנת 1987 (26,000 טונות ליצוא), ו-238,000 טונות ב-1988 (68,000 טונות ליצוא) [7]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 404,000 טונות PS, שמתוכם 216,000 טונות יידרשו בשוק המקומי [8].

טבלה 10 מסכמת את הצריכה של PS באירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. הטבלה מתייחסת באירופה לצריכה בארצות השוק האירופאי המשותף וכן אוסטרליה, פינלנד, נורווגיה, שוודיה ושווייץ.

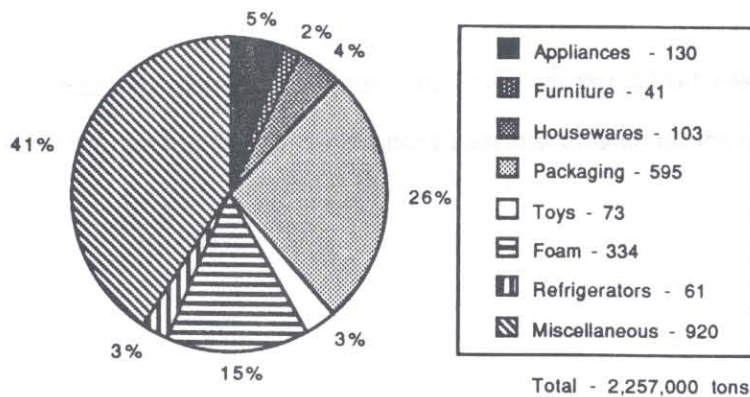
Western Europe



Japan



USA



צריכה באלפי טונות						
יפן		ארה"ב		אירופה		השימוש
1989	1988	1989	1988	1989	1988	
-	-	130	122	233	225	מכשירי חשמל
-	-	-	-	17	17	תעשית רכב
375	343	-	-	-	-	חשמל ותעשייה
-	-	41	46	68	68	ריהוט
-	-	103	110	168	168	כלי בית
260	238	595	300	840	822	אריזה
-	-	61	50	96	97	מקורים
-	-	73	77	50	50	צעצועים
155	135	334	289	-	-	קצר
205	197	920	1,213	197	210	שונות
995	914	2,257	2,207	1,669	1,657	סה"כ
87	90	95	73	-	-	יצוא
1,082	1,004	2,352	2,280	1,669	1,657	סה"כ כללי

טבלה 10: השימוש ב-PS במערב אירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,3,4].

צפוי שהצריכה של PS בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-3,053,000 טונות והיצוא של חומר זה מתוך

ארה"ב יגיע ל-45,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשיתי	אריזה	תחבורה	אחר
-	259	726	354	30	-	992	11	681
24%*	5%*	33%*	16%	6%*	8%*	10%	-	24%*

טבלה 11: צריכת PS באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר

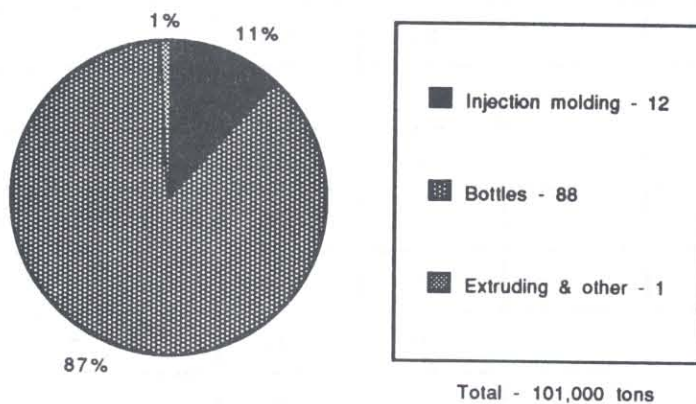
שמהווה השימוש ב-PS (*) - כולל פולימרים סטירנים אחרים [1].

פוליאאתילן טראפּתלאט - PET משמש בארבעה קוי ייצור עיקריים: סיבים, יריעות, חומר גלם לבקבוקים וכבסיס לחומר הנדסי מרוכב המכיל זכוכית. יריעות PET משמשות לסרטים מגנטיים בקלטות אודאו ווידאו, לסרטים לשמושים רפואיים וכן לאריזה ולשוק מוצרי החשמל. הדרישה לסרטים מגנטיים צפויה לגדול בצורה רציפה בשנים הקרובות ולהגיע לשיאי גידול בשנים 1993-1995 בהם חזוי גידול ניכר בצריכת מכשירי הוידאו הביתיים. יישומים אחרים כולל יריעות PET בעיבוד מתכתי (metallized PET film) לאריזות מזון וכמתגי מגע הרגישים להפעלת לחץ. ב-1970 יריעות הו 100% משוק ה-PET. ב-1985 ירד ערך זה בארה"ב ל-45% בלבד [1].

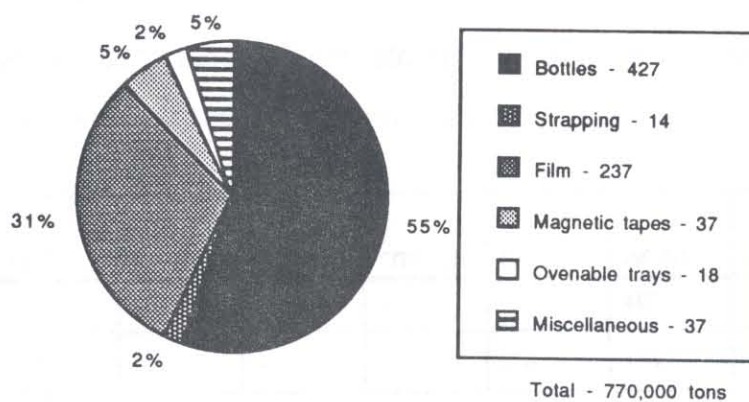
באמצע שנות השבעים הוכנס PET כאחד משני מועמדים להחליף זכוכית בבקבוקי שתיה קלה מוגזת. המועמד השני היה על בסיס פוליאקרילוניטריל. לשני החומרים תכונות מתאימות לחסימת מעבר גז, לשניהם שקיפות גבוהה ובנוסף שני החומרים קלים מזכוכית ובטוחים יותר. בעקבות הסכנה הפוטנציאלית שבמונומר השארי אקרילוניטריל, נחסמו בפני הפולימר השווקים המביאים אותו במגע ישר עם מזון או משקה, ואלה פנו לשימוש ב-PET. פוליאאתילן טראפּתלאט התקבל בשוק בצורה מזהירה, בעיקר לבקבוקי משקה בנפח שני ליטר. הודות למשקלו הקל, בטיחות הצרכן ובטיחות במילוי ומשלוח, תפס PET את כל שוק בקבוקי המשקאות הקלים בנפח זה. השיקולים הכלכליים והבטיחותיים אינם מחייבים עדין ייצור בקבוקים קטנים יותר ופחיות מ-PET, אך גם כאן החלה כבר חדירה לשווקים סלקטיביים. צפוי שתהליך זה יואץ בעקבות בעיות איכות הסביבה ואפשרויות מיחזור PET [1]. לאחרונה הוצגה האפשרות למחזור בקבוקי PET לקצף מבודד בתהליך חדשני המעלה את צמיגות ההתך ומאפשר לכידת בועות גז בטרם התמצקות. היתרון של קצף PET הוא בכך שאין הוא פולט עשן סמיך שחור כדוגמאת קצף PS [14]. במקביל למגמה של החלפת זכוכית בבקבוקים בנפח שני ליטר ב-PET, החלו יצרני הפולימר לפתח יישומים אחרים כגון בקבוקים למשקאות לא מוגזים, יריעות לאריזה ומגשים לחימום בתנור. בין המוצרים המשווקים בבקבוקי PET נמצאים משקאות חריפים, שמן בישול, חרדל ומוצרים רפואיים. עיקר המגמה לעבור לבקבוקי PET בא על חשבון השימוש בזכוכית. מוערך כי במערב אירופה נצרכו 150,000 טונות PET בשנת 1989 לייצור בקבוקים [14]. מקור אחר מעריך את הצריכה הכוללת של PET במערב אירופה ב-1988 בכ-220,000 טונות המהווים גידול של 19% לעומת השנה הקודמת, ואת הצריכה ב-1989 בכ-270,000 טונות [5]. התחזית היא להכפלת הדרישה ל-PET בארה"ב בשנת 2000 יחסית לזו של 1985, כשחלק גדול מגידול זה יהיה עד 1992 [1].

פיתוח נוסף הינו מגש לחימום בתנור. קיימים שני סוגים שזכו להצלחה מסחרית. האחד מבוסס על

Japan



USA



צריכת PET ב-1989 באלפי טונות

קרטון חמצופה ב-PET, והשני עשוי כולו מ-PET מגובש. שוק זה צפוי להתפתח בעקבות העליה בשימוש בתנורי מיקרו-גל שבהם לא ניתן להשתמש במגשי מתכת (אלומיניום). פותחו גם מגשים המתאימים לחימום מזון הן בתנור מיקרו-גל והן בתנור קונבנציונלי [1].

צריכה באלפי טונות				
יפן		ארה"ב		
1989	1988	1989	1988	השימוש
88	81	427	423	בקבוקים
12	11	-	-	הזרקה
-	-	237	232	יריעות
-	-	37	36	סרטים מגנטיים
-	-	18	14	מגשי חימום
-	-	14	14	רצועות קשירה
1	1	37	19	אחר
101	93	770	740	סה"כ
-	-	97	104	יצוא
101	93	867	844	סה"כ כללי

טבלה 12: השימוש ב-PET בארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [3,4].

צפוי שהצריכה של PET בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-1,201,000 טונות והיצוא של חומר זה מתוך ארה"ב יגיע ל-68,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה הבאה:

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר
-	-	204	66	-	-	794	-	136
-	4%	8%	-	-	6%	8%	18%	-

טבלה 13: צריכת PET באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר שמהווה השימוש ב-PET [1].

PET		PP		HDPE		LDPE/LLDPE		PS		PVC		מדינה
צריכה	ייצור	צריכה	ייצור	צריכה	ייצור	צריכה	ייצור	צריכה	ייצור	צריכה	ייצור	
0	0	110	145	120	105	155	170	45.5	44	186	180	אוסטרליה
-	-	70	-	*	-	185	-	70	-	86	-	אוסטריה
-	-	85	620	100	355	180	650	68	305	150	305	בלגיה
0	0	217	295	196	276	448	641	126	136	382	470	ברזיל
16	0	160	190	283	299	502	1,125	166	167	392	335	קנדה
-	-	59.3	-	-	-	201.3	-	40.7	-	69.5	-	דנמרק
0	-	20	-	45	-	160	-	40	-	75	-	פינלנד
-	-	400	575	300	240	690	939	250	370	825	1,010	צרפת
-	-	628	532	796	764	933	707	-	-	1,198	1,412	מערב גרמניה
-	-	73.7	110.1	*	-	152	221.4	20.7	-	119.8	192.8	הונגריה
1	.8	50	34	100	40	220	105	38	28	220	150	הודו
3.1	0	32.2	0	29.7	0	69.4	85	20.4	16.6	36.5	80.2	ישראל
55	-	555	-	380	-	830	-	350	-	870	-	איטליה
-	414	1,440	1,559	829	953	1,337	1,427	1,122	1,067	1,804	1,838	יפן
-	-	109	300	83	140	179	726	81	215	204	343	הולנד
5	-	12.8	-	21.4	-	36	-	8.1	-	27	-	ניו-זילנד
15	-	13	-	40	-	75	-	12.5	-	52	-	נורווגיה
6.5	6.5	57	50	105	80	140	130	20	12	123	130	דרא"פ
21.8	9	168.7	197.6	289.6	279.7	339.8	471.6	122.7	128.8	324.4	302.1	ספרד
79	69.2	460	298.8	340	128.4	680	196.6	180	126.9	590	335.8	בריטניה
745	750	3,216	3,300	3,668	3,811	4,618	4,717	2,281	2,353	3,760	3,789	ארה"ב
-	-	256	224	239	185	246	205	188	238	890	791	טאיוון

טבלת 14 ריכוז נתוני ייצור וצריכת חומרי צריכה באלפי טונות ב-22 מדינות ב-1988 (*) - מציין

שחעד עבד HDPE כלול ב-LDPE/LLDPE [8,13].

טבלה 14 מרכזות נתונים על ייצור וצריכת חומרי צריכה ב-22 מדינות ברחבי העולם ב-1988. נראה כי יש אי התאמה בין נתוני ייצור PET ביפן המופיעים כאן לבין נתוני הצריכה המופיעים בטבלה 12; ייתכן שהפרש זה נובע מיצוא גדול של PET מתוך יפן. טבלה 15 המובאת להלן מסכמת את אמצעי הייצור לחומרי צריכה באפריקה ובמזרח התיכון ב-1987 וכן מציגה תחזית ל-1990.

PVC		PS		PP		HDPE		LDPE/LLDPE		מדינה
1990	1987	1990	1987	1990	1987	1990	1987	1990	1987	
-	-	-	-	-	-	70	-	160	160	קאטאר
142	142	20	20	48	48	80	80	225	225	דרא"פ
35	35	25	25	-	-	-	-	48	48	אלגיריה
200	200	100	100	200	-	91	91	605	605	ערב הסעודית
80	80	-	-	-	-	40	40	90	90	מצרים
25	25	31	16	50	-	-	-	150	100	ישראל
120	120	40	16	220	60	40	40	400	200	טורקיה
60	-	-	-	68	-	80	-	50	-	לוב
120	-	-	-	105	35	60	-	120	-	ניגריה
-	-	-	-	-	-	-	-	130	-	קוואיט
-	-	-	-	50	-	60	-	100	-	אירן
-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	עירק
25	25	-	-	-	-	-	-	-	-	מרוקו
807	627	216	177	741	143	541	251	2,078	1,428	סח"כ

טבלה 15: אמצעי הייצור לחומרי צריכה באפריקה ובמזרח התיכון ב-1987 ותחזית ל-1990 באלפי

טונות [15].

- (1) Plastics: A.D. 2000; Production and Use Through the Turn of the Century (1987).
- (2) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Western Europe, Modern Plastics International, pp. 31 - 32, January 1990.
- (3) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - United States of America, Modern Plastics International, pp. 35 - 44, January 1990.
- (4) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Japan, Modern Plastics International, pp. 33 - 34, January 1990.
- (5) Market Report, European Plastics News, January 1989.
- (6) Figures based on statistics supplied by the Ministry of International Trade and Industry (MITI) and the Japanese Plastics Federation, Modern Plastics International, p. 33, January 1990.
- (7) A. T. Hu, Information Concerning ROC Polymer & Plastics Industry (personal communication).
- (8) Focus on Taiwan: Rapid Growth as Trading Nation, European Chemical News ,pp. 10-17, February 1990.
- (9) Polypropylene Develops Further - in Blends, Copolymers, Compounds, Modern Plastics International, p. 61, March 1990.
- (10) Low-cost PP-based Resins Provide Competition for Engineering Materials, Modern Plastics International, p. 74, December 1989.
- (11) Goodrich Plans to Reposition PVC as 'Engineering Resin for the '90s', Modern Plastics International, p. 26, March 1990.
- (12) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Canadian Resin Statistics, Modern Plastics International, pp. 44 - 45, January 1990.
- (13) International Status Report on Plastics for 1988, International Plastics Associations Directors.
- (14) PET Bottles Recycled into Insulation Foam, Chemical & Engineering News, pp. 25-26, February 12, 1990.
- (15) R. M. Marchelli, Out of Africa, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, 1989.

פרק 2, פולימרים הנדסיים (engineering polymers)

אחת ההגדרות של פולימרים הנדסיים היא חומרים תרמופלסטיים השומרים על יציבות מימדית ועל רוב התכונות המכניות מעל 100°C ומתחת ל- 10°C [1]. הפולימר הנדסי הראשון היה נילון שפותח בשנות השלושים בחברת Du Pont. כיום נכללים בקטגוריה זו שרפים רבים. אחדים כגון PBT, PC, PMMA, ABS, PA, POM, SAN ו-PET נחשבים לפולימרים הנדסיים 'פשוטים', ואילו אחרים ביניהם PPS, PEEK, PAI, PEI, PES, APE ו-PSU ו-PA11/12 נקראים חומרים יחודיים (specialties) או פולימרים הנדסיים בעלי בצועים טובים במיוחד (high performance engineering polymers) [2]. חומרים אלה כבר הוכיחו עצמם בישומים רבים על בסיס תכונותיהם החשמליות, התרמיות, הכימיות והפיזיקליות. הם נחונים בחוזק וצפיפות גבוהים ובאלונגציה טובה. בנוסף, הם עמידים בשחיקה, קורוזיה ונגיפה וחלקם אף אינו בוער. בנוסף לפולימרים אלה נכללים בהגדרה של פולימרים הנדסיים נתכים ותערובות אשר ידונו בפרק נפרד. פרק נוסף יטפל בחומרים מרוכבים שגם בהם פולימרים משמשים כחומרים הנדסיים.

ההשתייכות של פולימרים לתת-קבוצה זו או אחרת בתוך משפחת הפולימרים הנדסיים אינה מוגדרת באופן חד-משמעי, וחלוקה שונה מתגלה במקורות שונים. לדוגמא, חלק מהמקורות רואים ב-PET המשמש ליצור בקבוקים חומר הנדסי, בעוד אחרים מתייחסים אליו כאל חומר צריכה (commodity). רוב המקורות המדווחים על צריכת 'פולימרים הנדסיים' אינם מציינים לאיזה פולימרים הכוונה, ונראה כי אצל אחדים נתון זה אינו כולל לפחות את הצריכה של ABS. טבלה מס' 1 המבוססת על חמישה מקורות שונים מציגה את הצריכה של פולימרים הנדסיים בארה"ב ובאירופה למספר שנים וכן תחזית בארה"ב לשנים 1993 ו-2000.

מוערך שהצריכה הכלל עולמית של פולימרים הנדסיים ב-1988 היה כ- 10^6 טונות [3]. נתונים תעשייתיים מראים כי נכון ל-1988 חומרים אלה החליפו כ-12.5% (על בסיס נפחי) מהמתכות בשימוש. תחזיות מורות כי המגמה של החלפת מתכות מסוימות בפולימרים הנדסיים תמשך עד סוף המאה, כך שבשנת 2000 כ-20% מהמתכות בשימוש יוחלפו ע"י חומרים פלסטיים. תחזית זו צופה שהשוק העולמי לפולימרים הנדסיים בתחילת המאה הבאה יהיה פי ארבע מהשוק הנוכחי ויגיע לכ- $8 \cdot 10^6$ טונות.

הגידול הצפוי בן 400-500% תלוי לא רק בפיתוח מתמשך של פולימרים הנדסיים חדשים, אלא בהתארגנות כוללת של תעשיית הפלסטיקה ושל הגורמים הנלווים אליה. תדרש השקעה עצומה במתקנים לייצור החומרים וכן במכשור עיבוד מתאים. עם הגברת ההבנה של שיקולי תכנון הנדסי ינוצל פוטנציאל האינטגרציה שיש לחומרים פלסטיים להמיר מספר רכיבים בחלק בודד. פעולות הרכבה וגימור למתכות כגון

ניקוי, הברקה וצביעה ניתנות לביטול כאשר משתמשים בחומרים פלסטיים. ההרכבה של רכיבים פלסטיים יכול להעשות בזול ע"י חיבורי snap fit או שיטות הלחמה שונות [3].

שנה	ארה"ב	אירופה	יפן
1985	587,900 ⁽⁴⁾	600,000	313,000
1986	622,000	651,000	345,000
1987	707,000	706,000 ⁽²⁾	389,000
1992	944,000	943,000	514,000
1997	1,213,000	1,209,000	685,000
2000	1,539,000 ⁽⁴⁾	1,530,000	853,000

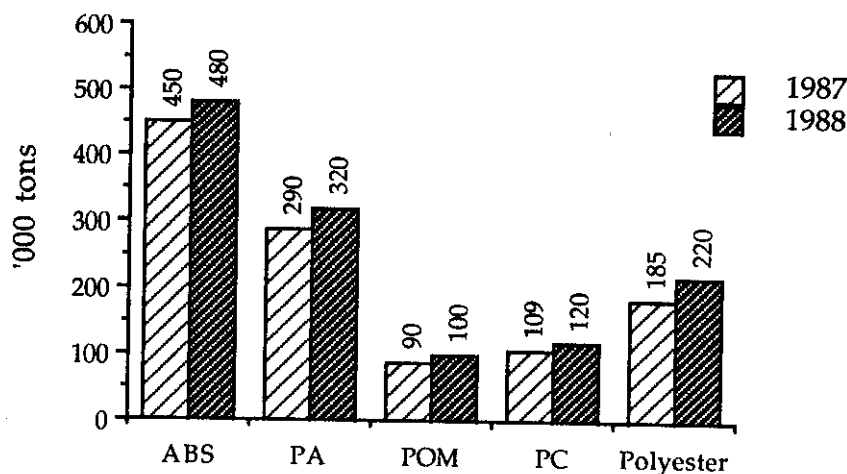
טבלה 1: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב ובאירופה בטונות.

לפולימרים הנדסיים שמוש נרחב בתחומי האלקטרוניקה, המכשור, תעשיית הרכב והתעשייה האווירית. תכונות העמידות התרמית בטמפרטורות מעל 100°C וכן עמידותם בקורוזיה מנוצלות במערכות הבאות במגע עם כימיקלים, באביזרי סניטציה, במכשירי חימום וכן באריזות רב-שכבתיות למוצרים טכניים, מזון ותרופות. עם עליית ההספק בקוי מתח גבוה יידרשו חומרים העמידים לטמפרטורות בתחום 150-210°C שישמשו כתמיכות למרכיבים נושאי זרם. החומרים המתאימים הם פולימרים תרמוסטים ופולימרים הנדסיים. חומרים אלה משמשים גם ליצור גופי כלי עבודה חשמליים ומכשירי חשמל ביתיים. כמו כן הם משמשים ליצור רכיבים מיקרואלקטרוניים לעיבוד נתונים ותקשורת. פולימרים הנדסיים בעלי שקיפות גבוהה דוגמת PMMA ו-PC משמשים לתקליטורים (compact disks) ולאמצעי איחסון מידע הנקרא באמצעות ליזר. כמו כן, ניתן באמצעות תוספים שונים להגדיל את המוליכות החשמלית של חומרים פלסטיים, אולם היתרון הוא מוגבל עקב הפגיעה בתכונות אחרות של החומר. שמוש נרחב נעשה לפולימרים הנדסיים בתעשיית הרכב. אחד השימושים החשובים הוא המרת חלקי מתכת והורדת משקל הרכב בעקבות משברי הנפט [8].

רבים צופים עתיד מזהיר לפולימרים ההנדסיים. צפוי גידול של 28% בצריכה בארה"ב בין השנים 1988-1993 [7]. בסקר שנערך בקרב 21 מעבדים, 33 ספקי חומר גלם, 8 ספקי תוספים ו-41 ספקי ציוד נמצא כי 90% מהמשיבים צופים עליה לצריכה של פולימרים הנדסיים בשנות התשעים ו-10% חוזים שוק ללא שינוי

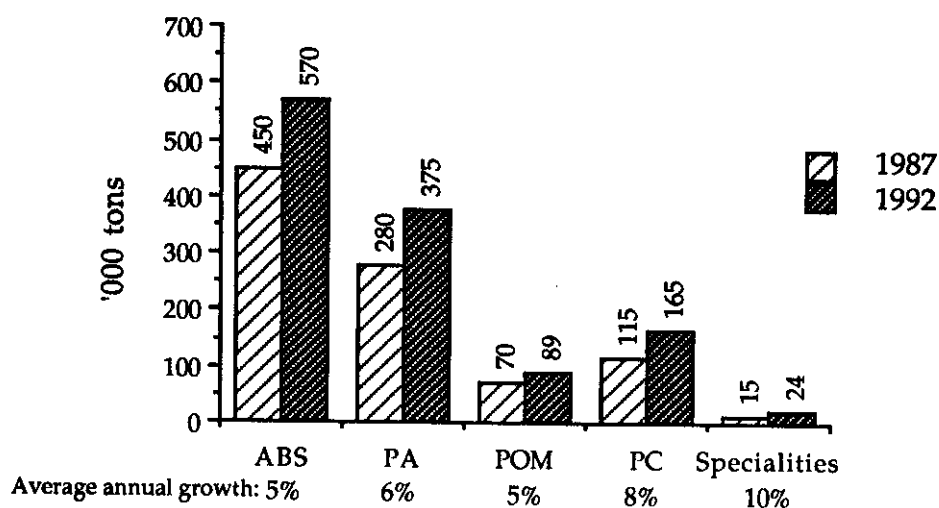
בצריכה. לחומרי צריכה 51% צופים עליה בצריכה, 35% צופים שוק ללא שינוי ו-14% צופים ירידה בצריכה. לחומרים תרמוסטטים 36% צופים עליה בצריכה, 48% צופים שוק ללא שינוי ו-16% צופים ירידה בצריכה. לכלל הפולימרים התחזיות של המשיבים היו 73% לעליה בצריכה, 24% לשוק ללא שינוי ו-4% לירידה בצריכה [9].

בהמשך מובאים מספר ציורים המתארים את צריכתם של פולימרים הנדסיים באירופה ובארה"ב בשנים שונות ואת התפלגות הצריכה לפי מגזרי שוק.

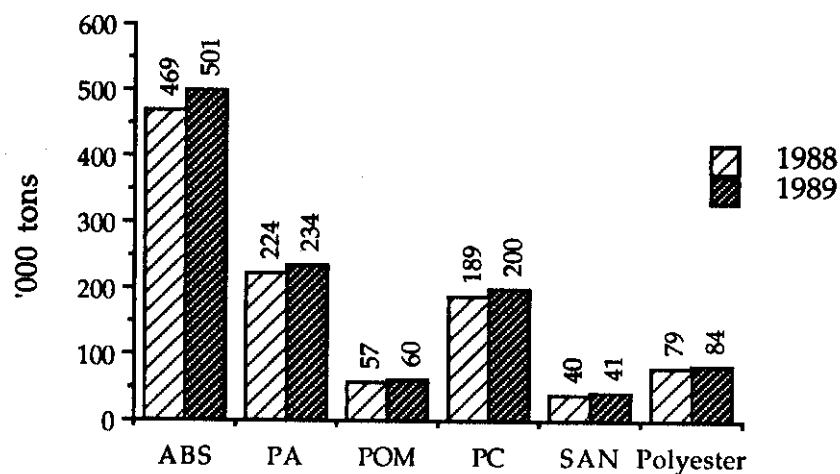


ציור 1: צריכת פולימרים הנדסיים במערב אירופה ב-1987 ו-1988 [10].

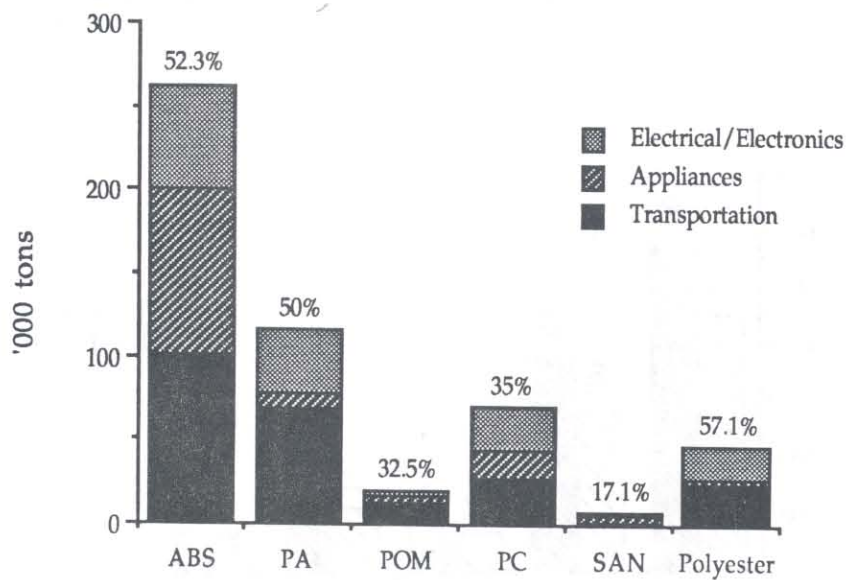
גם מגזרי השוק אינם מוגדרים באופן זהה במקורות השונים. אחד המגזרים הגדולים ביותר הוא תעשיית הרכב המוכלל לעתים בשוק התחבורה (transportation) ולעתים מוגדר כשוק עצמאי (automotive). בנוסף לתעשיית הרכב הקל כולל מגזר התחבורה את תעשיית המשאיות והאוטובוסים, את המספנות, את תעשיית הרכבות וכן את התעשייה האווירית (aerospace) המייצרת מטוסים, מסוקים ולוויינים. שוק גדול אחר הוא לשמושים חשמליים/אלקטרוניים, כאשר שוק זה מפוצל לעתים לקבוצות הבאות: מכונות משרדיות (business machines) שהן מחשבים, מסופים, מחשבוניס, קופות רושמות, מכונות צילום ומכונות כתיבה; מכשירי חשמל ביתיים (appliances) הכוללים תנורי בישול, מקררים, מכונות כביסה, שואבי אבק ומכונות תפירה; מכשירי אלקטרוניקה שהן טלוויזיות, מערכות שמע, מכשירי וידאו וציוד תקשורת; וציוד רפואי כגון מכשירי רנטגן, אולטראסאונד ו-NMR.



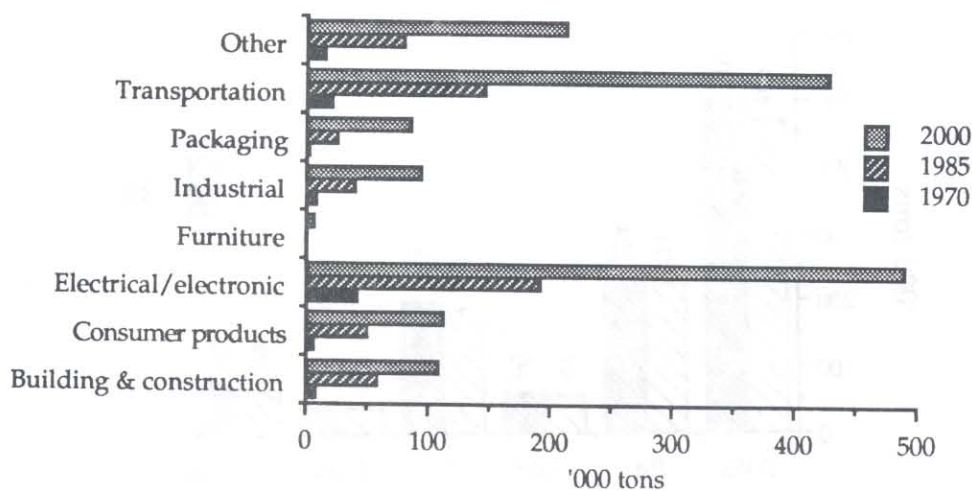
צִיּוֹר 2: צריכת פולימרים הנדסיים במערב אירופה ב-1987 ותחזית ל-1992.[2]



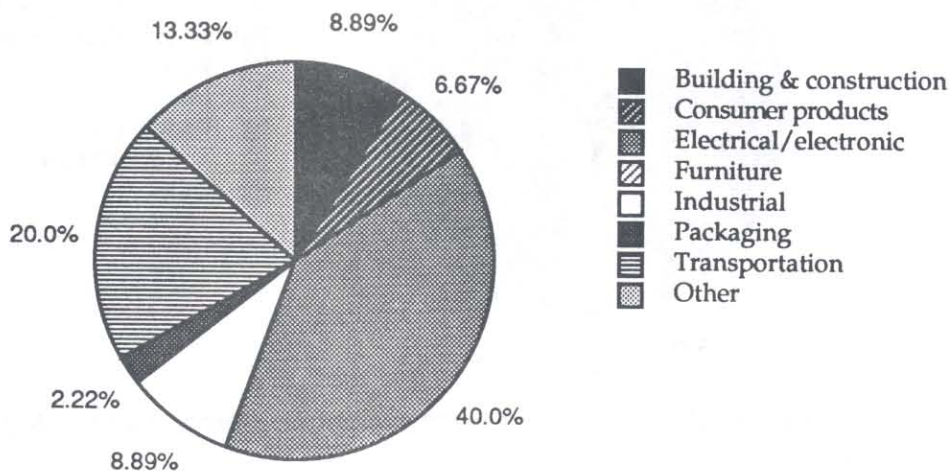
צִיּוֹר 3: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב ב-1988 ו-1989.[11]



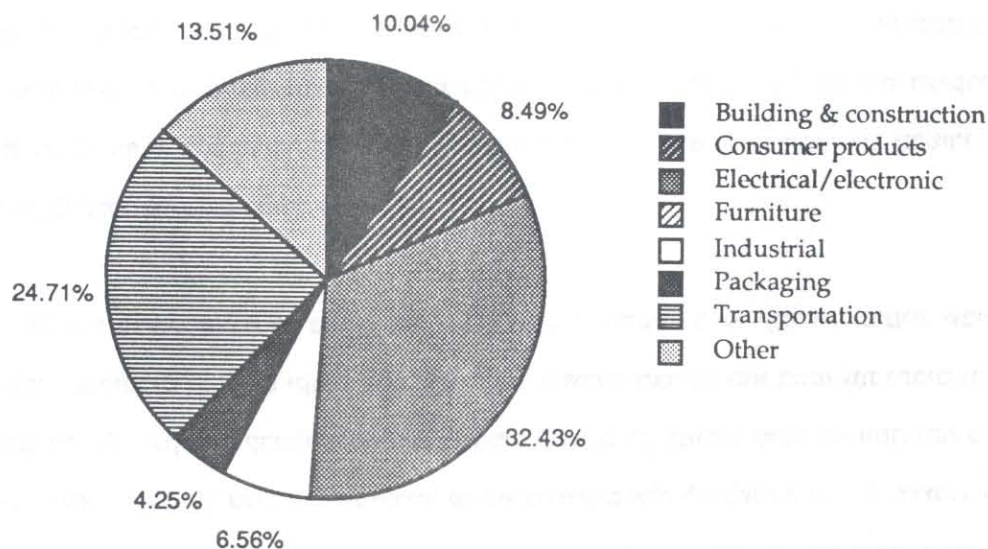
צור 4: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב ב-1989 לפי שלושת מגזרי השוק העיקריים [11].



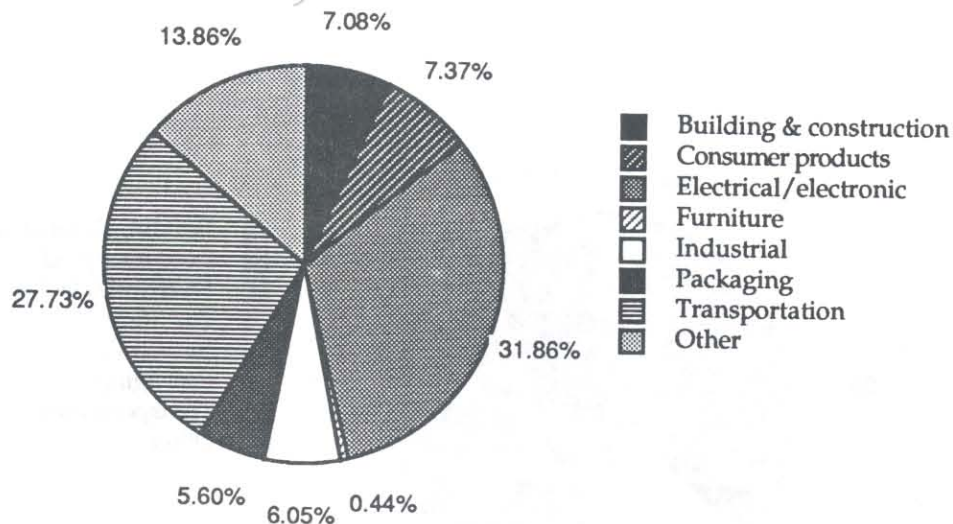
צור 5: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב ב-1970, 1985, ותחזית לשנת 2000 [4].



ציור 6: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב לפי מגזרי שוק ב-1970 [4].



ציור 7: צריכת פולימרים הנדסיים בארה"ב לפי מגזרי שוק ב-1985 [4].



ציון 8: צריכת פולימרים הנדסיים הצפויה בארה"ב לפי מגזרי שוק ב-2000 [4].

להלן סקירה מפורטת של צריכת הפולימרים ההנדסיים העיקריים, ומגזרי השוק בהם הם נצרכים:

ABS/SAN - בדומה לפוליסטירן, הדרישה ל-ABS/SAN הכפילה עצמה בשנים 1970-1985, כשרוב הגידול היה בחלקה הראשון של תקופה זו. אולם, שלא בדומה לפוליסטירן לא חזרה הדרישה ל-ABS/SAN לשיאה בשנים 1979-1980. כמו כן עקב תחרות עם פולימרים אחרים על אותם שווקים לא צפויה עליה משמעותית בצריכה בשנים הקרובות. שני שמושים מסורתיים של ABS נמצאים בתחרות קשה במיוחד. פוליסטירן החל לשמש לייצור הדופן הפנימית בדלתות מקררים, ו-PVC הוא המתחרה העיקרי בשוק הצנרת. גורם נוסף שהביא לירידה בצריכת ABS בארה"ב היא יבוא מוצרים מן החוץ. רוב מכשירי הטלפון בארה"ב, לדוגמא, מיוצרים במזרח הרחוק [3].

על מנת לבלום ירידה זו, פתחו יצרני ABS מוצרים חדשים בעלי עמידות תרמית שביכולתם להתחרות בפולימרים הנדסיים יקרים יותר. אפיק נוסף להעלאת הצריכה הוא באמצעות נתכים ותערובות עם חומרים כגון נילון ופוליקרבונט. לחומרים על בסיס ABS ונילון עמידות טובה בשחיקה והם משמשים במכסחי דשא. צפוי שתוך שנים ספורות יצליחו שימושים חדשים אלה להעלות את סך כל הדרישה ל-ABS. לא צפוי מחסור באספקת ABS באמצעות המתקנים הנוכחיים עד שנת 2000. רווחיות הענף בארה"ב נפגמה לאחרונה בעקבות יבוא זול מאסיה ודרום אמריקה. אולם יבוא זה צפוי לקטון עם עליית הדרישה באזורים אלה.

טבלה 2 מסכמת את הצריכה של ABS באירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 על פי שימושים שונים. הטבלה מתייחסת באירופה לצריכה בארצות השוק האירופאי המשותף וכן אוסטריה, פינלנד, נורווגיה, שוודיה ושווייץ.

צריכה באלפי טונות						
יפן		ארה"ב		אירופה		השימוש
1989	1988	1989	1988	1989	1988	
128	123	98	96	84	84	מכשירי חשמל
102	100	112	108	122	120	תעשית הרכב
-	-	29	25	86	78	חשמל ואלקטרוניקה
-	-	3	2	11	10	ריהוט
-	-	68	65	8	7	צנרת ואביזרי צנרת
-	-	15	14	27	26	ציוד ספורט
118	111	-	-	-	-	חלקי מכונות
114	110	176	159	147	140	שונות
462	444	501	469	485	465	סה"כ
94	90	61	111	-	-	יצוא
556	534	562	580	485	465	סה"כ כללי

טבלה 2: השימוש ב-ABS במערב אירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [11,12,13].

הצריכה המערב אירופאית של ABS היתה גבוהה ב-1989 מאשר ב-1988 ב-4.3%. נתון זה משקף בעיקר את העליה בצריכת ABS לשימוש במכונות משרדיות לעומת הסטגנציה בצריכה לשימוש במכשירי חשמל ביתיים [12].

הייצור של ABS בטאיון ב-1986 היה 151,000 טונות (59,000 טונות ליצוא), 208,000 טונות ב-1987 (87,000 טונות ליצוא), ו-301,000 טונות ב-1988 (177,000 טונות ליצוא) [14]. התחזית ל-1995 בטאיון היא לייצור של 646,000 טונות ABS, כשמה 292,000 טונות יידרשו בשוק המקומי [15].

צפוי שהצריכה של ABS/SAN בארה"ב בשנת 2000 תגיע ל-545,000 טונות והיצוא של חומרים אלה מתוך ארה"ב יגיע ל-91,000 טונות [1]. הצריכה בתוך ארה"ב תהיה לפי החלוקה המובאת בטבלה 3.

בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	שימוש תעשייתי	תחבורה	אחר	סה"כ
54	66	95	20	168	141	544
1%	3%	3%	6%	14%	4%	

טבלה 3: צריכת ABS/SAN באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז מכל מגזר שמהווה השימוש ב-ABS/SAN [3].

טבלה 4 המובאת להלן מסכמת את צריכת סטירן אקרילוניטריל (SAN) בארה"ב ב-1988 ו-1989.

אלפי טונות		השימוש
1989	1988	
4	5	מכשירי חשמל ביתיים
2	2	תעשית הרכב
1	1	סוללות
7	7	תרכוב
11	10	כלי בית
8	8	אריזה יצוקה
8	7	שוטות
41	40	סה"כ
20	25	יצוא
61	65	סה"כ כללי

טבלה 4: צריכת סטירן אקרילוניטריל (SAN) בארה"ב ב-1988 ו-1989 [11].

ABS/SAN ניתנים לעיבוד בכל השיטות המקובלות לעיבוד פולימרים תרמופלסטיים. כווני פתוח כוללים עתה שיפור העמידות התרמית, חוזק חנגיפה ותכונות הזרימה של ABS/SAN, החברה היפנית

Mitsubishi Rayon פתחו לאחרונה קופולימר של ABS ופניל מלאימיד העומד ב-130°C. סוגים מסחריים של ABS כוללים את Novadur של Bayer, Luran S של BASF, Cycolac של Borg-Warner, Magnum ו-Rovel של Dow, Geloy של General Electric, Lustran של Monsanto, Elaslens של Showa Denko ו-Ronfalin S של חברת DSM.

נילון (PA) - נילון הפך לשם נרדף לפוליאמיד. רוב החומרים בקבוצה זו הם גבישיים למחצה, חזקים, בעלי מודול אלסטיות גבוה וטמפרטורת התכה גבוהה, אך עם זאת ניתנים לעיבוד בתהליכי עיבוד קונבנציונליים. נילונים ארומטיים לחלוטין הידועים בשם אראמידים (aramids) אינם מעובדים כחומרים פלסטיים, אלא כסיבים דוגמאת Kevlar ו-Nomex של חברת Du Pont. חומר זה יוזכר בפרק על חומרים מרוכבים.

נילון משמש בישומים רבים במספר לא קטן של מגזרי שוק. תעשיית הרכב עושה שימוש נרחב בנילונים כצנרת לדלק, מיכלים לנוזלים שונים ברכב, מסננים, להבי המאורר, חלקים במנגנוני נעילה, מחברים שונים, פגושים ופנסי הרכב. שימושים אחרים הם במכשירי אלקטרוניקה מגוונים ובמכונות משרדיות. בתעשייה, נילון משמש לצנרת אויר דחוס, לגלגלי שיניים, מערכות תמסורת ומאזני כלי עבודה. שימושים אחרים הם לציוד רפואי וכן במגזרי החקלאות (ממטרות וצנרת), הבניה (חלקי דלתות וחלונות), הספורט והפנאי (מחבטים, מקלות גולף, ציוד סקי), האריזה (בעיקר מזון והבטחון (כדורי סרק, קסדות).

סוגים רבים של נילון 6 מיצרים ע"י מספר גדול של חברות. ביניהם Akulon של חברת Akzo, Ultramid של BASF, Durethan B של Bayer, Maranyl F של ICI, Technyl C של Rhône-Poulenc. סוגים מסחריים אחדים של נילון 66 הם Ultramid A של BASF, Durethan A של Bayer, Maranyl A של ICI, Vydine של Monsanto, Technyl AB של Rhône-Poulenc. נילון 6.10 ו-6.12 מיוצר בין השאר ע"י חברות BASF, Du Pont, Huls ו-Rhône-Poulenc. Ato Chemie ו-Ube Industries מייצרים נילון 11, ונילון 12 מיוצר ע"י Huls, Ato Chemie ו-Grilon - EMS [16].

הטבלאות הבאות סוקרות את הצריכה של נילון באירופה, ארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989. טבלה 5 המתיחסת לאירופה וארה"ב אינה מפרידה בין צריכת סוגי הנילון השונים ואילו טבלה 6 המציגה נתונים על יפן מבחינה בין נילון 6, 66 ו-11/12.

צריכה באלפי טונות				
ארה"ב		אירופה		השימוש
1989	1988	1989	1988	
11	10	13	13	אקסטרוזיצה, פילמנטים
26	26	38	38	יריעות דקות
17	16	-	-	חוטים וכבלים
15	14	19	17	יריעות ומוטות
-	-	6	6	אחר
69	66	76	74	סה"כ אקסטרוזיצה
9	8	17	15	חורקה: מכשירי חשמל
19	16	27	25	מוצרי צריכה
22	20	63	57	חשמל/אלקטרי
21	20	-	-	תעשייתי
-	-	23	21	חלקי מכונות
69	69	86	79	תחבורה
-	-	17	16	אחר
140	133	233	213	סה"כ חורקה
25	25	14	13	אחר
234	224	323	300	סה"כ
37	36	-	-	יצוא
271	260	323	300	סה"כ כללי

טבלה 5: השימוש בנילון באירופה וארה"ב בשנים 1988 ו-1989 [11,12].

אלפי טונות		
1989	1988	חשימוש
56	52	נילון 6: הזרקת
23	20	אקסטרוזיה
37	31	נילון 66: רכב
18	16	חשמל/אלקטי
7	6	אחר
14	13	נילון 11/12: הזרקת
6	5	אקסטרוזיה
161	143	סה"כ

טבלה 6: צריכת נילון ביפן ב-1988 ו-1989 [13].

פוליקרבונט (PC) - פוליקרבונט משמש בנוסף להיותו פולימר הנדסי בזכות עצמו גם כמרכיב במספר תערובות הנדסיות עם PET, PBT, SMA, HIPS, ABS. לאחרונה פותחו גם נתכים תלת-מרכיביים המכילים פוליקרבונט. פוליקרבונט ניתן לעיבוד בשיטות עיבוד קונבנציונליות לחומרים תרמופלסטיים. בד"כ החומר מוזרק לתבניות או מועבד ליריעות באקסטרוזיה. שיטות אחרות כוללות ניפוח, עיצוב תרמי (thermo-forming) ואקסטרוזיה של פרופילים. היישומים העיקריים של פוליקרבונט מבוססים על שקיפותו הגבוהה, חוזקו ועמידותו האקלימית הטובה (weatherability) לאחר הוספת תוספים מתאימים. בתעשיית הרכב משמש פוליקרבונט לפנסים, שידת המכשירים, פגושים, חלקי גוף ואביזרי נוי שונים. בבניה השימושים העיקריים הם לחלקי דלתות וחלונות, רהוט, צנרת סניטרית, זיגוג מגן, מתקני תליה לווילונות וכן חלונות עמידים בוגדלים עבור בתי-ספר. במכונות משרדיות משמש פוליקרבונט במארזים וחלקים של מכונות צילום, מסופי מחשב ומכשירי טלפון. שימושים אחרים הם בתחומי הרפואה, תעשיית המטוסים, תאורה ומכשירי אלקטרוניקה. שימוש חדש לפוליקרבונט הוא בייצור תקליטורים [16].

צריכת פוליקרבונט באירופה היתה 109,000 טונות בשנת 1987 עם עליה של 10% ל-120,000 טונות ב-1988. המספר ההולך וגדל של שימושי PC במכשירי חשמל בא בעיקר על חשבון PP ו-ABS. הצרכן הגדול ביותר של פוליקרבונט באירופה היא מערב גרמניה ואחריה בסדר יורד - צרפת, איטליה ובריטניה [10].

אלפי טונות		
1989	1988	השימוש
17	16	מכשירי חשמל
14	12	מכונות משרדיות
25	24	חשמל/אלקטרוניקה
49	47	זיגוג
6	5	איחסון מידע
12	10	אריזה
20	19	ספורט ופנאי
27	28	תחבורה
30	28	אחר
200	189	סה"כ
82	77	יצוא
282	266	סה"כ כללי

טבלה 7: צריכת פוליקרבונט בארה"ב באלפי טונות ב-1988 ו-1989 [11].

פוליאצטל (POM) - פוליאצטל שווק באופן מסחרי לראשונה ב-1960 ע"י חברת Du Pont. סוגים שונים של פוליאצטל קיימים, שהשוני ביניהם מתבטא בעיקר בצמיגות ההתך. מודיפיקציות נוספות מתקבלות ע"י מגוון רחב של תוספים, מיצבים וחומרי שריון. פוליאצטלים מעובדים בעיקר בהזרקה, אולם קיימים גם סוגים בעלי צמיגות גבוהה יותר המתאימים לאקסטרוזיה של יריעות ולניפות.

פוליאצטל משמש בתחום רחב של יישומים הנדסיים, רבים מהם כתחליף למתכות - בעיקר סגסוגות אלומיניום ואבץ. השימושים העיקריים בתעשית הרכב הם מתגים, מצופים לקרבורטור, מהדקים, משאבות דלק ומגננוני דלתות וחלונות. פוליאצטל משמש גם לשסתומים, ראשים למקלחות, ברזים, ידיעות, מאוררים, גלגלי שיניים, כפתורים, קלטות אודיאו, צעצועים, אביזרים קוסמטיים, רוכסנים, אבזמים ולאריזות שונות.

אלפי טונות		
1989	1988	השימוש
6	5	מכשירי חשמל/כלי עבודה
11	10	מוצרי צריכה
2	2	חשמל/אלקטרוניקה
7	7	שימושים תעשייתיים וסניטריים
13	12	תחבורה
5	5	אחר
60	57	סה"כ
5	5	יצוא
65	62	סה"כ כללי

טבלה 8: צריכת פוליאצטל בארה"ב באלפי טונות ב-1988 ו-1989 [11].

הספקים העיקריים של פוליאצטל הם Asahi Chemical, BASF, Hoechst - Celanese, Du Pont, SIR Consorzio ו-Mitsubishi Gas Chemicals, Polyplastic Japan. רוב הספקים המובילים מציעים עתה סוגי פוליאצטל משופרי גניפה. Du Pont הודיעה לאחרונה על פוליאצטל חדש בשם Delrin II המבוסס על טכנולוגית יצוב חדשה. החברה טוענת שלחומר החדש יהיה תחום רחב ביותר של טמפרטורות עיבוד, ושהחומר יהיה נטול בעיות עיבוד מוכרות בפוליאצטל כגון ריח וזיהום תבניות. Delrin II צפוי להקלט בעיקר בשווקי הרכב והחומרה [16]. צריכת פוליאצטל באירופה היתה 90,000 טונות בשנת 1987 עם עליה של 10% ל-100,000 טונות ב-1988 [10].

פוליאסטר תרמופלסטי (PET/PBT) - הסוגים העיקריים של פוליאסטר תרמופלסטי הם פוליאטילן טראפתאלט (PET) ופוליבוטילן טראפתאלט (PBT). את השימוש העיקרי של PET כחומר צריכה (commodity) המשמש ליצור בקבוקי משקה, סקרנו כבר בפרק 1. כאן אנו נעמוד על השימושים של פוליאסטר תרמופלסטי כחומר הנדסי.

פולאטילן טראפתאלט הוכר ראשית כסיבים (Terylene ו-Dacron) או כיריעות (Melinex של ICI ו-Mylar של Du Pont). החומר בצורתו הטהורה אינו מתאים לעיבוד בתבניות בגלל תכונותיו. הסוגים

המסחריים של PET מכילים עד כדי 50% סיבי זכוכית או 40% מלאנים מינרליים. חומרים צפידים בעלי חוזק נגיפה גבוה מושגים ע"י מודיפיקציות בעזרת פולימרים ואלסטומרים. כאמור, השוק הגדול ביותר עבור PET הוא בקבוקי משקה קל (בעיקר מוגז); שימושים הנדסיים כוללים חלקי מנועים ושנאים חשמליים, תקעים ושקעים, חלקי מכשירי חשמל קטנים (מכונות קפה, טוסטרים וכו'), חלקי רהוט משרדי ושימושים שונים בתעשיית הרכב: ידיות דלתות וחלונות, בתי מנורה, חלקי מגבים, חלקים במערכת החימום ומסילות לגגות נפתחים [16].

אלפי טונות		השימוש
1989	1988	
3	3	מכשירי חשמל
5	4	מוצרי צריכה
21	20	חשמל/אלקטרוניקה
13	12	שימוש תעשייתי
24	23	תחבורה
18	17	אחר
84	79	סה"כ
7	6	יצוא
91	85	סה"כ כללי

טבלה 9: צריכת PET/PBT לשימושים הנדסיים בארה"ב באלפי טונות ב-1988 ו-1989 [11].

ספקים עיקריים של PET כוללים Mitsubishi, Huls, Eastman, Du Pont, BIP Chemicals, Akzo, Toyobo Chemical, Toray Industries, Teijin Industries, Rhône-Poulenc [16].

פוליבוטילן טראפתאלט נחון ביציבות תרמית טובה, ספיגת לחות נמוכה ותכונות כימיות טובות. הפולימר עמיד לשמן מנוע, דלק ונוזלים אחרים בטמפרטורות עד 60°C. תערובות של PBT עם פולימרים ואלסטומרים נחונים בחוזק נגיפה גבוה. PBT משורין מכיל בד"כ 30% סיבים. החומר מעובד בעיקר בהזרקה ואקסטרוזיה. השימושים העיקריים כוללים מארזי משאבות במכשירי חשמל, מתגים שונים, מחברים, מחשבי-כיס, מארזי מכונות קפה וטוסטרים, ידיות לכלי מטבח ולהבים למעבדי מזון. בתעשיית

הרכב PBT משמש לחלקי בתי מנורה, חלקי מערכת תבלימים, מתגים, חלקים במערכת ההצתה, רכיבים בתא המנוע וחלקי דלתות, חלונות ומראות.

ספקים עיקריים של פוליבוטילן טראפאתלט הם Du Pont, Bayer - Mobay, BASF, Akzo - Celanese, Hoechst, Eastman, Rhône-Poulenc, Huls, General Electric ו-Thermofil [16].

אלפי טונות		השימוש
1989	1988	
17	15	תעשיית הרכב
31	29	חשמל/אלקטרוניקה
6	5	אחר
54	49	סה"כ
4	4	יצוא
58	53	סה"כ כללי

טבלה 10: צריכת פוליבוטילן טראפאתלט (PBT) ביפן באלפי טונות ב-1988 ו-1989 [13].

צריכת פוליאסטר תרמופלסטי (PET/PBT) באירופה היתה 185,000 טונות בשנת 1987 עם עליה של 19% ל-220,000 טונות ב-1988. הצרכן הגדול ביותר היא צרפת המתמקדת בשוק האלקטרוניקה [10].

פולימרים הנדסיים ייחודיים (specialties) - המונח פולימרים הנדסיים ייחודיים אינו מוגדר באופן חד-משמעי והוא מתייחס בד"כ לחומרים יקרים המיוצרים בכמויות קטנות הנחונים בתכונות ייחודיות. דוגמאות לחומרים אלה הם פלואורו-פולימרים (טפלון ודומיו) ופוליאמידים. פולימרים ייחודיים אינם מיוצרים רק ע"י יצרני הפולימרים הגדולים, אלא גם ע"י חברות קטנות יותר המשתמשות במגוון רחב של מונומרים המכילים קבוצות פונקציונליות למטרות צילוב והארכת שרשראות לאחר שלב הפילמור העיקרי. יצרן הפולימרים הייחודיים מסוגל לעמוד במחיר גבוה יותר של חומרי גלם מאשר יצרן חומרי צריכה, מכיון שהרווח שלו גבוה הרבה יותר. חדירה למגזר מצומצם זה דורש תחכום רב וידע טכנולוגי נרחב [17]. פולימרים אחרים הנכללים בקבוצה מצומצמת זו הם PPS, PEEK, PAI, PA 11/12, PEI, PES, PPE, ו-PSU. הצריכה הכוללת של חומרים אלה במערב אירופה בשנת 1986 היתה 12,000 טונות בלבד [5].

ההערכה היא שפחות מ-2% מהפולימרים ההנדסיים הנצרכים הם יחודיים. כ-49% מכמות זו היא PPS, וכ-39% פולימרים שונים על בסיס סטירן. שאר החלוקה היא PAR (5%), PES (4.5%), PEI (1.8%), ו-PEEK (0.5%). השימוש ב-PPS מתחלק לפי 30% לחשמל/אלקטרוניקה, 20% לשימושים תעשייתיים, 10% לתחבורה, 5% למכשירי חשמל ביתיים ו-35% לשימושים אחרים. קצב הגידול השנתי של תומרים אלה צפוי להיות 15-20%, כך שחלקם בשוק לקראת אמצע שנות התשעים יעלה לכ-4% [16].

התכונות האטרקטיביות של פולימרים הנדסיים יחודיים הם עמידות תרמית וכימית, בעירות (flamability) נמוכה, דרגה נמוכה של פליטת עשן, תכונות חשמליות טובות וקלות עיבוד. אלה הנחונים בעמידה בטמפרטורות גבוהות במיוחד (high temperature (HT) polymers) צפויים לגדול בקצב שנתי ממוצע של 8-12%, כך שהשוק העולמי לחומרים אלה יגיע לחמישה ביליון דולר ב-1998. שלוש הקבוצות המובילות של פולימרי HT הם פלואורו-פולימרים, אראמידים ופוליאמידים. השווקים העיקריים בסדר יורד הם שימושים חשמליים/אלקטרוניים, שימושים תעשייתיים ושימושים לתעשייה האווירית. הערכה של חברת Kline & Company לצריכת פולימרי HT ב-1988 עם תחזית ל-1998 מובאת בטבלה 11.

אזור גאוגרפי	1988	1998
צפון אמריקה	50,000	115,000
אירופה	25,000	60,000
אסיה	10,000	65,000
סח"כ	85,000	240,000

טבלה 11: הערכה של חברת Kline & Company לצריכת פולימרי HT בטונות ב-1988 ותחזית לצריכה בשנת 1998 [18].

הערכה אחרת לצריכה הכלל עולמית של פולימרים ייחודיים ב-1988 מתארת צריכה כוללת של 34,000 טונות בערך הכולל של 550 מיליון DM [19]. פירוט הצריכה מובא בטבלה 12.

חפולימר	אחוז על בסיס משקל	אחוז על בסיס ערך
PPS	42%	30%
PSU	30%	26%
LCPs	8%	19%
PAR	7%	4%
PES	7%	6%
PEI	4%	5%
PEK	1%	8%
PAI	1%	2%
סה"כ (%)	100%	100%
סה"כ	34,000 טונות	DM 550 $\cdot 10^6$

טבלה 12: פירוט הצריכה הכלל עולמית של פולימרים יחודיים על בסיס משקלי ועל בסיס ערכי

בשנת 1988 [19].

- (1) M. Bakker in M. Grayson, ed., *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., Vol. 9, p. 118, Wiley-Interscience, New York (1980).
- (2) Speciality Polymer Blends and Alloys; Western Europe - 1987, Kline & Company, INC.
- (3) J. D. Mengden, A Growing Global Industry, in *World Plastics and Rubber Technology*, pp. 237-240, Cornhill Publications Limited, 1989.
- (4) Plastics: A.D. 2000; Production and Use Through the Turn of the Century (1987).
- (5) Data from Bayer appearing in reference (2).
- (6) Data from the Society of Plastics Industry appearing in *Plastics World*, p. 3, January 1990.
- (7) Data from Frost and Sullivan appearing in *European Plastics News*, P. 30, March 1990.
- (8) N. P. Cheremisinoff, Emerging Technologies and Applications for Polymers, *JOM*, January 1990, pp. 10-16.
- (9) The Nineties - Survey, *Plastics Technology*, pp. 41-48, January 1990.
- (10) Market Report, *European Plastics News*, January 1989.
- (11) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - United States of America, Modern Plastics International, pp. 35 - 44, January 1990.
- (12) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Western Europe, Modern Plastics International, pp. 31 - 32, January 1990.
- (13) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Japan, Modern Plastics International, pp. 33 - 34, January 1990.
- (14) A. T. Hu, Information Concerning ROC Polymer & Plastics Industry (personal communication).
- (15) Focus on Taiwan: Rapid Growth as Trading Nation, *European Chemical News*, pp. 10-17, February 1990.
- (16) High Performance Engineering Thermoplastics, S. R. Harrison & Associates, May 1988.
- (17) Speciality Polymers III, Skeist Incorporated, December 1989.
- (18) HT Polymers Set to Grow, *European Plastics News*, p. 3, March 1990.
- (19) Technology Viewpoint, *European Plastics News*, p. 21, January 1990.

פרק 3: נתכים ותערובות (Alloys & Blends)

מבחינה כלכלית, הרבה יותר אטרקטיבי ליצור חומרים פולימריים חדשים ע"י תערובות של פולימרים קיימים מאשר לסנתז חומרי יסוד חדשים. העירבוב הוא מכני ונעשה באקסטרוזר או בכל ציוד עירבול אחר כגון Banbury mixer. למרות היתרון שביצירת תערובות, המתבטא במספר הרב של פטנטים בתחום זה, השימוש התעשייתי בתערובות עדיין מוגבל. אחת הסיבות לכך היא הירידה בתכונות החומרים כאשר מערבבים שני פולימרים באופן אקראי. מעטים הם הפולימרים המתערבבים ללא צורך בטיפול מקדים באחד או שני מרכיבי התערובת, כך שמספר התערובות המסחריות הפוטנציאליות הוא מוגבל. את תוצר העירבוב נהוג לסווג כנתך (alloy) או תערובת (blend). נתכים הינם תערובות הומוגניות לחלוטין של פולימרים תואמים (compatible). לנתך פאזה רציפה בודדת והיא מאופינת ע"י טמפרטורת מעבר זכוכית, T_g , אחת. תערובת מתקבלת מעירבוב פולימרים בלתי תואמים או תואמים חלקית. תערובת מאופינת ע"י יותר מטמפרטורת מעבר זכוכית אחת והיא מורכבת ממספר פאזות. בדרך כלל יש להשתמש בגורם מתאם (compatibilizer) לייצב את הפאזות השונות ולמנוע אגלומרציה. כאשר אין תאימות בין מרכיבי התערובת מתקבלות פאזות שונות עם גבולות חדים ביניהן. התכונות המכניות המתקבלות הן ירודות ויש נטיה להיווצרות סדקים באזורים הבין-פאזיים.

נתכים ותערובות פולימריים מצטיינים כחומרים הנדסיים הודות לתכונותיהם המכניות והתרמיות המעולות, הבאות לידי ביטוי במיוחד תחת עומס. בעקבות כך, תופעות זחילה מואטות ועולה היציבות המימדית. התכונות מתקבלות למשל מעירבוב פולימרים אמורפיים צפידים בעלי T_g גבוה (כגון PPE) עם תוספים משפרי נגיפה (HIPS). דוגמא אחרת להשבחת תכונות היא עירבוב פולימרים גבישיים למחצה בעלי עמידות כימית גבוהה (כגון PBT) עם פולימרים צפידים (כגון PC) כך שמתקבלת תערובת צפידה מבחינה מכנית ועמידה מבחינה כימית. נתכים ותערובות מסחריים מאופיינים בד"כ ע"י חוזק מתיחה, צפידות וחוזק נגיפה גבוהים. לחלקם גם עמידות תרמית טובה ואף עמידות בפני בעירה.

בשנות השבעים התפתחה הטכנולוגיה המתיחסת לתערובות פולימרים לדרגה כזו שהיא תפסה מקום כענף עיקרי במחקר ופיתוח של פולימרים. העניין הרב בתערובות נובע מהיכולת לספק אין-ספור פרופילי תכונות עבור היישומים המגוונים שיש לחומרים פולימריים. יתרון נוסף שיש לתערובות הוא פיתוח קצר וזול יחסית, ואפשרות חדירה מהירה יותר לשוק.

למרות שחומרים פולימריים מסוימים כגון HIPS או LLDPE/LDPE חנים תערובות על פי הגדרה, מקובל להתייחס אליהם כאל חומרי צריכה. לחומרים תרמופלסטים אחרים תכולה של 10% - 5 תוספים שונים ואף הם אינם נכללים בקטגוריה של תערובות. אנו נתייחס כאן לחומר פולימרי כאל תערובות אם תכולת המרכיב חדל יותר עולה על 10%.

ההערכה היא שבשנת 1987 נצרכו במערב אירופה 973,000 טונות של פולימרים הנדסיים ובכללם 214,000 טונות תערובות ונתכים המוערכים בכ-707.2 מיליון דולר. כמות זו מהווה כ-1.3% מסך 17 מיליון טונות פלסטיק שנצרכו במערב אירופה [1]. בארה"ב נצרכו בשנת 1987 כ-250,000 טונות תערובות ונתכים בערך משוער של 833.2 מיליון דולר [1,2]. בעוד הגידול השנתי בצריכת כלל הפולימרים מוערך בכ-4% - 3, לפולימרים הנדסיים ובכללם נתכים ותערובות צפוי גידול שנתי של כ-6% עד שנת 1992. הערכה אחרת [3] היא כי צריכת הנתכים והתערובות בשנת 1986 היתה 290,000 טונות בארה"ב, 180,000 טונות באירופה ו-110,000 טונות ביפן. אותו מקור צופה את הצריכה ב-1996 כ-721,000 טונות בארה"ב, 396,000 טונות באירופה ו-292,000 טונות ביפן, כאשר הגידול השנתי הממוצע בתקופה זו היא 10% - 9. נתונים אלה מסוכמים בטבלה 1.

אזור גאוגרפי	1986 ⁽³⁾	1987 ^(1,2)	1996 ⁽³⁾
ארה"ב	290,000	250,000	721,000
מערב אירופה	180,000	214,000	396,000
יפן	110,000	-	292,000

טבלה 1: צריכת נתכים ותערובות על פי אזור גאוגרפי בשנים 1986 ו-1987 ותחזית לצריכה בשנת 1996 [1,2,3].

לעליה הצפויה במספרם של התערובות והנתכים מספר סיבות:

- מתחיל לפוג תוקפם של הפטנטים שהגנו על התערובות והנתכים הראשונים.
- זול יותר להחדיר לשוק תערובת חדשה מאשר פולימר יסוד חדש.
- רוב הפולימרים המשמשים לתערובות הימוצלותי הם נפוצים.
- רבות הן התערובות שמחירן עולה עד כ-50% מעל למחיר סך כל המרכיבים. החזר ההשקעה יכול

לעלות במקרים אלה על 20%.

צפוי שהעליה במספר חספסים תוזיל את מחיר התערובות לצרכנים, אשר התלוננו על מחירים גבוהים ב-1987. בטווח הארוך, יתכן שירידת המחירים תביא לצמצום המחקר והפיתוח בתחום זה.

השימוש הסופי	10 ⁶ kg		10 ⁶ DM		% גידול שנתי
	1987	1992	1987	1992	
רכב	142.0	213.9	876.1	1,280.3	9
שימושים חשמליים	15.1	19.2	110.6	141.1	5
מכונות משרדיות	15.1	18.3	96.1	116.0	4
מכשירי אלקטרוניקה	12.0	16.3	82.6	111.3	6
מכשירים ביתיים	8.2	9.6	50.4	60.6	3
ספורט ופנאי	6.8	9.3	53.2	67.8	7
כלי עבודה	3.5	4.6	30.4	38.0	6
תחבורה	3.0	4.5	17.9	25.0	9
רפואה	1.1	1.4	8.3	10.6	5
אחר	7.9	11.4	59.7	78.5	7
סה"כ	214.7	308.5	1,385.3	1,929.2	8

טבלה 2: הערכת הצריכה של נתכים ותערובות לפי שימושים סופיים במערב אירופה ב-1987

ו-1992 [1].

עקב תכונותיהן המשובחות של התערובות, הן משמשות במגוון ייצור רבים ומגוונים. הצרכן העיקרי היא תעשיית הרכב (automotive). צריכת הפלסטיק בתעשייה זו מתחלקת לפי 90% לייצור מכונות ומשאיות קלות, 6% לייצור סירות ו-4% לצרכים אחרים [4]. תעשיית הרכב צרכה בשנת 1987 66% מכלל התערובות במערב אירופה ו-53% מאלה בארה"ב. צפוי שהצריכה של תערובות בתעשיית הרכב במערב אירופה בשנת 1992 תעלה ל-69% מכלל צריכת תערובות הפולימרים. מספרים אלה עולים בהרבה על חלקה של תעשיית הרכב במערב אירופה בצריכת כלל הפולימרים ההנדסיים, העומדת על 22% בלבד. המחיר הממוצע של תערובות שנצרכו ע"י תעשיית הרכב המערב אירופאית ב-1987 היה \$ 3.4/kg. 53,000 טונות של

PP/EPDM שהיא התערובת הנפוצה ביותר בתעשייה זו נמכרו במחיר \$ 2.1/kg והיוו 37% מהכמות הכוללת. שאר הנתכים והתערובות שהיוו 67% מאלה שנצרכו ע"י תעשיית הרכב נמכרו במחיר ממוצע של \$ 3.9/kg. המכירות של נתכים ותערובות לתעשיית הרכב צפויות לגדול בקצב שנתי ממוצע של 9%, כאשר עיקר הגידול תהיה בצריכה של PP/EPDM הצפויה לגדול בקצב שנתי ממוצע של 12%. תופעה זו משקפת את הנטייה הכללית לשימוש בחומרים פחות יקרים מבלי לפגוע ברמת התכונות. טבלה 2 מסכמת את הצריכה של נתכים ותערובות במערב אירופה לפי מגזרים שונים ב-1987 וכן הערכה לצריכה הצפויה ב-1992.

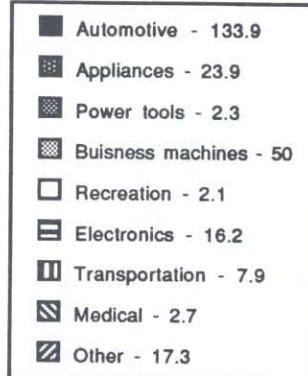
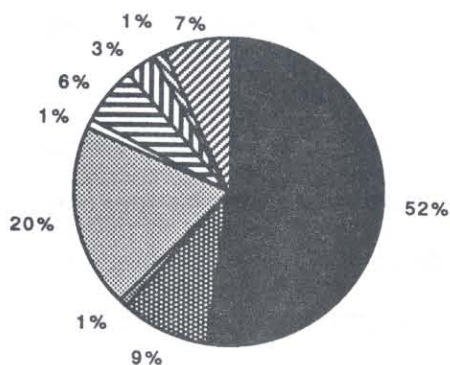
שלושת המגזרים העיקריים במערב אירופה (תעשיית רכב, שימושים חשמליים, מכונות משרדיות) מהוות יחד 80% מהשוק [1]. נתח שוק דומה תופסים גם בארה"ב שלושת המגזרים העיקריים (תעשיית רכב, מכשירים ביתיים, מכונות משרדיות) ומהוות 81% מהשוק [2]. טבלה 3 מסכמת את השימוש של נתכים ותערובות לפי מגזרים בארה"ב ב-1987.

% מתוך סך הכל				
השימוש הסופי	10 ⁶ kg	10 ⁶ \$	kg	\$
רכב	133.9	427.3	53	52
מכשירים ביתיים	50.0	152.5	18	18
מכונות משרדיות	23.9	83.0	10	10
מכשירי אלקטרוניקה	16.2	54.7	6	7
תחבורה	7.9	28.7	3	3
רפואה	2.7	8.9	1	1
כלי עבודה	2.3	9.0	1	1
ספורט ופנאי	2.1	11.1	1	1
אחר	17.3	58.0	7	7
סה"כ	251.2	833.2	100	100

טבלה 3: הערכת הצריכה של נתכים ותערובות לפי שימושים סופיים בארה"ב ב-1987 [2].

USA

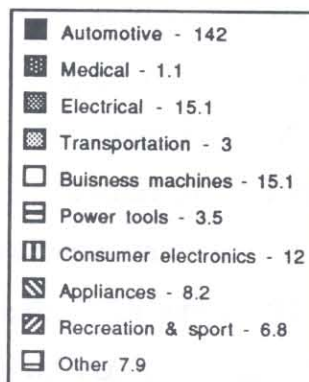
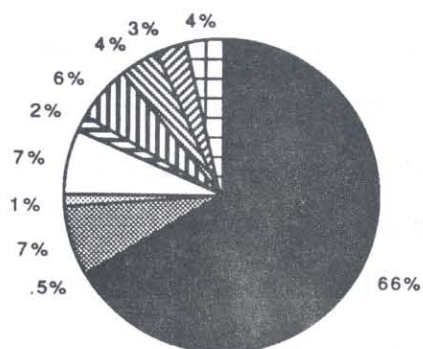
1987



Total - 251,200 tons

Western Europe

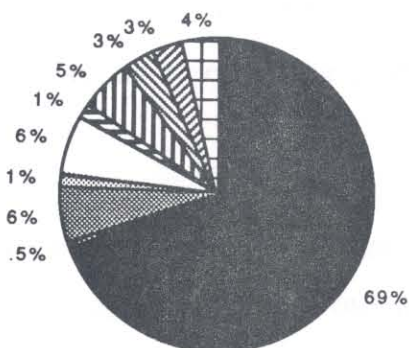
1987



Total - 214,700 tons

Western Europe

1992



Total - 308,500 tons

צריכת נתכים ותערוכות בארה"ב ואירופה ב-1987 והצריכה החזויה באירופה ב-1992 באלפי טונות

החלוקה הפנימית של התערובות והנתכים השונים בכל מגזר כפי שהתבטאה בתעשייה המערב אירופאית בשנת 1987 מסוכמת בהמשך בטבלה 4. טבלה 5 המובאת אחריה מציגה את צריכת החומרים השונים בשנת 1987 ומציגה תחזית לצריכה במערב אירופה בשנת 1992.

ניתן לראות בטבלאות 4 - 2 כי תעשיית הרכב מובילה לא רק בצריכה הכוללת של נתכים ותערובות אלא היא גם הצרכן הגדול ביותר של כל חומר בנפרד. צפוי שלהתפתחות תעשייה זו תהיה השפעה מכרעת על פיתוחם של פולימרים הנדסיים בכלל ושל נתכים ותערובות בפרט. לחומרים אלה הפוטנציאל המתאים להחליף חלקי מתכת מסוימים בגוף הרכב ובתוכו. כ-73% ממשקל הרכב עדיין עשוי ממתכת, 10% מפלסטיק, 5% מגומי, 3% מזכוכית ו-9% מחומרים אחרים. המעבר לשימוש בחומרים פלסטיים בייצור כלי רכב החל בשנות השבעים בכוונה להוריד את משקל הרכב על מנת לחסוך בדלק. דוגמאות לחומרים המתאימים לשימוש כחלקי גוף חיצוניים החייבים להיות קלים, ניתנים לצביעה בקו-ייצור, בעלי חוזק נגיפה גבוה וקשיחים הם PC/PBT, Mod PBT, PC/PA, Mod PA ו-PPE. אחד הצרכים שטרם נתמלא ע"י נתכים ותערובות היא היכולת להיות ניתנים לצביעת E-Coat בתנורים בטמפרטורות מעל 180°C, והחומר היחיד העומד כיום בקריטריון הזה הוא PA/PPO/HIPS (Noryl GTX). המגמה הנוכחית בתחום זה היא להגיע למוצרים המכילים פיגמנטי צבע בעלי 'אימור מושלם' (Class A) ולמנוע את הצורך בצביעה [3]. פגושים מיוצרים מ-PC/PBT, Mod PBT ו-PP/EPDM, ואילו התערובות המשמשות בחלקים פנימיים ברכב הם PPE/PS ו-SMA/PC [3]. לאחרונה הוצע להחליף את התערובות לייצור פגושים ב-PP/EPR [5]. השימוש הכולל בפלסטיק בתעשיית הרכב מתחלק לפי 31% בחלקי גוף חיצוניים, 25% בפגושים, 22% בחלקים פנימיים, 12% במושבים ו-10% במערכות דלק, חשמל וחלקים בתא המנוע [1]. צפוי שבשנת 2000 ל-20% מכלי הרכב המיוצרים בארה"ב יהיו פנלים פלסטיים בגוף החיצוני ואילו 70% מחומרי הגלם לפגושים יורכבו מנתכים ותערובות [3]. צפוי שתערובות זולות יותר על בסיס PP (TPOs) שהן בעלות חוזק נגיפה, עמידות בחום ועמידות אקלימית טובים תחדורנה למגזר זה וכן למגזרים נוספים במקום פולימרים הנדסיים אחרים, יקרים יותר [6]. במיוחד מוזכרת האפשרות של החלפת PVC/ABS בייצור חלקים פנימיים ברכב [7].

דחית בניתם של מכוניות מדגם GM-80 בעלות גוף מפלסטיק ע"י חברת General Motors בארה"ב תאיט במידה מסוימת את חדירתם של נתכים לשוק הרכב [3]. צריכת הנתכים והתערובות במערב אירופה לפי חלוקה גיאוגרפית תואמת באופן כללי את גודל תעשיית הרכב במדינות השונות והיא מוערכת כ-59% ע"י תעשיית הרכב הגרמנית, 20% בצרפת, 9% באיטליה, 7% בבריטניה ו-5% ע"י השאר [1].

הנתך או התערובת	מכשירי חשמל	רכב	מכונות משרד	מכשירי אלקטרי	שימוש חשמלי	רפואה	כלי עבודה	ספורט ופנאי	תחבורה	אחר	סה"כ
PP/EPDM	3.0	53.0	3.0	-	-	-	0.6	2.4	1.0	-	63.0
PPE/PS	2.0	11.2	6.0	7.2	9.2	0.8	-	-	0.8	2.8	40.0
ABS/PC	1.0	17.5	1.8	1.2	2.5	0.3	0.5	-	0.2	1.0	26.0
PC/PBT	-	22.5	1.0	0.3	0.3	-	0.2	0.1	-	0.6	25.0
ABS/PVC	1.0	15.0	3.0	3.0	2.0	-	-	-	0.5	0.5	25.0
Mod PA	0.5	6.5	-	-	0.6	-	2.0	3.0	0.5	2.6	15.7
Mod PC	-	4.6	0.1	-	-	-	-	1.3	-	-	6.0
Mod PBT	0.1	3.6	-	0.1	0.2	-	-	-	-	-	4.0
Mod Acet.	0.5	2.3	0.1	-	-	-	-	-	-	0.1	3.0
PPE/PA	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0
PC/PET	-	1.7	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-	-	2.0
PBT/PET	-	1.0	-	0.1	0.1	-	-	-	-	-	1.2
ABS/PA	-	0.6	-	-	-	-	0.2	-	-	-	0.8
PC/ASA	-	0.3	-	-	0.1	-	-	-	-	0.1	0.5
Mod PET	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2
PSU/PET	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2
ABS/PSU	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
PC/SMA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PPE/PBT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
סה"כ	8.2	142.0	15.1	12.0	15.1	1.1	3.5	6.8	3.0	7.9	214.7

טבלה 4: צריכת נתכי ותערובות פולימרים שונים באלפי טונות על פי מגזרי תעשייה במערב אירופה

בשנת 1987 [1].

הנתך או התערובת	צריכה ב-1987	צריכה ב-1992
PP/EPDM	63.0	109.3
PPE/PS	40.0	46.0
ABS/PC	26.0	38.0
PC/PBT	25.0	37.0
ABS/PVC	25.0	31.8
Mod PA	15.7	19.7
Mod PC	6.0	8.0
Mod PBT	4.0	5.0
Mod Acetal	3.0	3.5
PPE/PA	2.0	3.0
PC/PET	2.0	2.4
PBT/PET	1.2	1.3
ABS/PA	0.8	1.4
PC/ASA	0.5	1.5
Mod PET	0.2	0.2
PSU/PET	0.2	0.2
ABS/PSU	0.1	0.2
סה"כ	214.7	308.5

טבלה 5: צריכת נתכים ותערובות באלפי טונות במערב אירופה ב-1987 והצריכה הצפויה ב-1992

[1].

ניתן למצוא בספרות גם השוואה בין צריכת הנתכים והתערובות ב-1986 לבין זו הצפויה ב-1996 [3].
ההתייחסות היא לאירופה, ארה"ב ויפן, כאשר חקטגוריה היפנית כוללת בתוכה לעתים את שאר העולם.

נתונים אלה מסוכמים בטבלה 6.

יפן		אירופה		ארה"ב		התערובות או שרף היסוד
1996	1986	1996	1986	1996	1986	
56.3	15.9	68.1	30.0	172.5	54.0	Polyolefins
18.2	6.4	47.2	34.0	55.8	33.1	PVC
1.8	.5	25.4	11.8	49.0	21.8	Polystyrene
9.5	2.3	8.6	2.7	39.0	15.0	Polyamide
86.7	44.0	91.7	44.5	166.6	79.4	PPE/PPO
45.9	19.1	26.8	10.9	57.2	20.9	Thermoplastic polyester
15.9	3.2	30.5	12.7	30.4	13.6	Polycarbonate
-	-	-	-	1.4	.5	PSO
2.7	.5	2.3	-	6.8	.5	PAR/PES
52.7	18.6	90.8	33.1	104.9	42.7	ABS/SMA
-	-	-	-	17.3	6.4	SAN

טבלה 6: צריכת נתכים ותערובות באלפי טונות בארה"ב אירופה ויפן ב-1986 והצריכה הצפויה

ב-1996 [3].

צרכן גדול נוסף של נתכים ותערובות היא תעשיית המכשירים החשמליים הביתיים (appliances). מכשירים אלה מסווגים לפי גודל למכשירים גדולים (תנורי בישול, מקררים, מכונות כביסה) ומכשירים קטנים (שואבי אבק, מכונות תפירה, מערבלי מזון וכו'). כ-8,200 טונות של נתכים ותערובות בערך של 26.2 מיליון דולר נצרכו ב-1987 ע"י תעשייה זו במערב אירופה. החומר הנצרך ביותר היה PP/EPDM [1]. בארה"ב צרכה תעשיית המכשירים החשמליים הביתיים 24,100 טונות של נתכים ותערובות בערך של 83.0 מיליון דולר. החומר הנצרך ביותר היה PPO/PS [2]. החלוקה הגיאוגרפית של צריכת נתכים ותערובות לייצור מכשירי חשמל ביתיים במערב אירופה היא 24% בצרפת וגרמניה כל אחת, 18% באיטליה, 12% בהולנד, 9% בבריטניה, 4% בספרד ו-9% בשאר המדינות.

חנתך/תערובות	כמות נצרכת	ערך (\$)
מערב אירופה		
PP/EPDM	3,000	6,240,000
PPE/PS	2,000	7,800,000
ABS/PC	1,000	3,900,000
ABS/PVC	1,000	2,600,000
Mod Acetal	500	2,390,000
Mod PA	500	2,08,000
ABS/PSU	100	780,000
Mod PBT	100	416,000
סה"כ	8,200	26,200,00
ארה"ב		
PPO/PS	16,400	55,000,000
Mod PA	2,000	10,600,000
ABS/SMA	1,950	6,400,000
PBT/PET	1,320	4,700,000
ABS/PC	680	2,300,000
ABS/PVC	680	1,700,000
PP/EPDM	540	1,200,000
Mod Acetal	270	1,100,000
סה"כ	24,100	83,000,00

טבלה 7: צריכת הנתכים והתערובות בתעשית המכשירים החשמליים הביתיים במערב אירופה

וארה"ב ב-1987 באלפי טונות [1,2].

באופן כללי למגזר המכשירים החשמליים הביתיים פוטנציאל טוב לחדירת פולימרים כתחליף למתכות. היתרונות עיקריים להמרה זו הן קלות המוצרים שתאפשר ניידות רבה יותר של המכשירים בתוך הבית, וכן האפשרות לחסוך את שלב צביעת המוצרים ע"י שימוש בפולימרים צבעוניים. עקב המגוון הרחב שיש למוצרים בקטגוריה זו רבות ושונות הן הדרישות לחומרי הגלם. חלקים במכונות כביסה, מדיחי כלים ומגהצי אדים הבאים במגע עם מים חמים נדרשים ליציבות מימדית ולעמידות למים. אחת התערובות המתאימות לצורך זה היא PPE/PS. חומר המתאים לחלקים סובבים נשחקים הוא Mod PA [3].

מערב אירופה		ארה"ב		המכשיר
חאחוז	אלפי טונות	חאחוז	אלפי טונות	
מסך חכל		מסך חכל		
24%	2,000	24%	5,900	שואבי אבק
12%	1,000	7%	1,725	מקררים
22%	1,800	6%	1,320	מכונות כביסה
16%	1,300	6%	1,270	מדיחי כלים
9%	700	5%	1,000	תנורי מיקרו-גל
17%	1,400	52%	12,580	אחר

טבלה 8: צריכת נתכים ותערובות לייצור מכשירים חשמליים ביתיים שונים במערב אירופה

וארה"ב ב-1987 באלפי טונות [1,2].

התחזית לשוק האמריקאי של מכשירים חשמליים ביתיים היא גידול שנתי ממוצע של 3% לצריכה של כ-27,000 טונות ב-1992 בערך כספי של 95.7 מיליון דולר. הגידול המהיר ביותר צפוי ל-ABS/SMA, שצריכתו צפויה לגדול ב-8% לשנה [2]. גידול שנתי ממוצע דומה צפוי במערב אירופה. מגור זה צפוי לצרוך 9,600 טונות נתכים ותערובות בשנת 1992 בערך של 31.5 מיליון דולר. הנטיה להשתמש בחומרים זולים יותר, יחד עם הגידול הצפוי בייצור תנורי מיקרו-גל ומדיחי כלים תגביר את השימוש ב-Mod PBT עד כדי קצב גידול שנתי של 15% [1].

הן במערב אירופה והן בארה"ב מגור המכונות המשרדיות מהווה את השוק השלישי בגודלו. צריכת הנתכים והתערובות בייצור מכונות משרדיות בשנת 1987 היתה 15,100 טונות במערב אירופה בערך של 50.0 מיליון דולר ו-23,900 טונות בארה"ב בערך של 83.0 מיליון דולר [1,2]. המכונות בקטגוריה זו הן מחשבים ואמצעי עיבוד נתונים, מסופים, מחשבוניים, קופות רושמות, מכונות כתיבה ומכונות צילום. החומר הנצרך ביותר במערב אירופה היה PPE/PS ש-6,000 טונות ממנו נצרכו בערך של 23.4 דולר. תערובת זו שהיא קשיחה מאוד, עמידה ל-UV, ניתנת לעיבוד למשטחים דקים ושמחירה זול יחסית משמשת לייצור גופי מחשבים אישיים, מכונות צילום וקופות רושמות. חומרים אחרים המשמשים לאותה מטרה הם ABS/PC

ו-PC/PET. מכונות כתיבה עשויות בדוד כלל מ-HIPS ו-ABS. ABS/PVC משמש בעיקר לייצור מקלדות. חלקים פנימיים כגון גלגלי שיניים ומחברים שונים עשויים מ-Mod Acetal, Mod PBT, ו-PBT/PET. החומרים המשמשים לייצור חלקים חיצוניים נדרשים ליציבות מימדית, חוזק נגיפה גבוהה, עמידות בפני שריטות, וגימור טוב. יש צורך גם בהגנה מפני הפרעות אלקטרומגנטיות וגלי רדיו. לעיתים התערובות היא בעלת תכונות חשמליות מתאימות ולעיתים יש צורך בצביעתה בצבע מתכתי.

מסך הכל	טונות	% מסך הכל
מחשבים אישיים ומיני מחשבים	10,700	70%
מכונות צילום	3,800	25%
מכונות כתיבה	600	4%

טבלה 9: צריכת הנתכים והתערובות בתעשית המכונות המשרדיות השונות במערב אירופה ב-1987 [1].

מאפין חשוב של תעשית המכונות המשרדיות במערב אירופה הוא שחלק ניכר מגופי המכונות העשויים פלסטיק מיוצרים עתה בדרום מזרח אסיה. כתוצאה מכך הצריכה המקומית של נתכים ותערובות פחותה מזו שניתן היה לצפות לה מתוך מספר המכונות המשווקות [1]. טבלה 10 מתארת את צריכת הנתכים והתערובות לייצור מכונות משרדיות על פי חלוקה גאוגרפית במערב אירופה ב-1987.

מסך הכל	טונות	% מסך הכל
מערב גרמניה	3,900	26%
בריטניה	2,700	18%
צרפת	2,100	14%
איטליה	1,800	12%
הולנד	1,100	7%
שאר מערב אירופה	3,500	23%

טבלה 10: צריכת הנתכים והתערובות בתעשית המכונות המשרדיות על פי חלוקה גאוגרפית במערב אירופה ב-1987 [1].

יצרני מכוונות משרדיות אחדים התלוננו על מחירים הגבוה של נתכים ותערובות. מכיון שנתח הרווח במגזר זה, ובמיוחד בשוק המחשבים האישיים, ירד בשנים האחרונות מספר חברות קטנות פשטו את הרגל. על מנת לשמור על רווחיות גבוהה, המירו אחדים מן היצרנים את השימוש בתערובות יקרות כמו PPE/PS או ABS/PC לחומרים זולים יותר כגון ABS, ABS/PVC ואפילו PVC [1].

השימוש בנתכים ותערובות לייצור מכוונות משרדיות במערב אירופה צפוי לגדול בקצב שנתי ממוצע של 4% עד שנת 1992. המכירות של מחשבים צפויים לגדול בקצב שנתי ממוצע של 6%, אולם יבוא חלקים מדרום מזרח אסיה עתיד להאיט את הגידול בצריכה המקומית בתערובות. צפוי שבשנת 1992 יצרו מגזר זה במערב אירופה 18,300 טונות נתכים ותערובות בערך של 60.4 מיליון דולר. החומר הנצרך ביותר ישאר PPE/PS שצריכתו צפויה להיות 6,600 טונות.

טונות	% מסך הכל	
4,800	40%	מערב גרמניה
2,300	19%	צרפת
2,300	19%	בריטניה
1,800	15%	איטליה
500	4%	הולנד
300	3%	שאר מערב אירופה

טבלה 11, צריכת הנתכים והתערובות בתעשיית מכשירי האלקטרוניקה על פי חלוקה גאוגרפית במערב אירופה ב-1987 [1].

גם שוק מכשירי האלקטרוניקה מהווה צרכן גדול של נתכים ותערובות, הן במערב אירופה והן בארה"ב. צריכת הנתכים והתערובות בייצור מכשירי אלקטרוניקה ביתיים בשנת 1987 היתה 12,000 טונות במערב אירופה בערך של 42.9 מיליון דולר ו-35,700 טונות בארה"ב בערך של 54.7 מיליון דולר [1,2]. בקטגוריה זו נכללים טלוויזיות, מכשירי אודאו, מכשירי וידאו וציוד תקשורת. כ-70% מהתערובות במגזר זה משמשים לייצור רכיבים פנימיים והשאר לבניית גופי המכשירים. הסיבה העיקרית לכך היא העלות הגבוהה יחסית של נתכים ותערובות. מתברר שאלה אינם הכרחיים לייצור גופי מכשירים וניתנים להחלפה בחומרים

זולים יותר כגון ABS או PS. התערובות הנצרכות ביותר במערב אירופה ב-1987 היתה PPE/PS ש-7,200 טונות ממנה, המהווים 60% מצריכת התערובות ע"י מגזר זה, נצרכו בערך של 28.1 מיליון דולר. 25% נוספים של השוק נתמלאו ע"י צריכת 3,200 טונות ABS/PVC בערך של 7.8 מיליון דולר. תערובת זו שהיא בעלת חוזק נגיפה גבוה ועמידות טובה בפני בעירה משמשת בגופי מכשירים ובמתברי חוטים. רכיבים אלקטרוניים זעירים עשויים מ-PC/PET, Mod PET, PSU/PET, ו-PES/PEEK.

השימוש בנתכים ותערובות לייצור מכשירי אלקטרוניקה במערב אירופה צפוי לגדול בקצב שנתי ממוצע של 6% עד שנת 1992. גם במגזר זה צפוי שיבוא חלקים מדרום מזרח אסיה עתיד להאיט את הגידול בצריכה המקומית בתערובות. צפוי שבשנת 1992 יצרו מגזר זה במערב אירופה 16,300 טונות נתכים ותערובות בערך של 57.9 מיליון דולר. החומר הנצרך ביותר ישאר PPE/PS שצריכתו צפויה להיות 8,800 טונות. צריכתם של חומרים שכלל לא שמשו במגזר זה ב-1987 כגון Mod PET ו-PSU/PET צפויה לגדול עקב תהליכי מזעור רכיבים אלקטרוניים. השימוש ב-PC/PET צפוי לגדול בשנים 1987-1992 ב-15% ושל ABS/PVC ב-10% באותה תקופה.

מגזר אחר הצורך נתכים ותערובות הוא מגזר התחבורה. בקטגוריה זו נכללים כל אמצעי התחבורה שלא בתחום תעשיית הרכב: מטוסים ומסוקים (אזרחיים וצבאיים), טילים ולוינים המשוגרים לחלל, אוטובוסים ומשאיות, אוניות ורכבות. צריכת הנתכים והתערובות בתחבורה בשנת 1987 היתה 3,000 טונות במערב אירופה בערך של 9.31 מיליון דולר ו-7,900 טונות בארה"ב בערך של 28.7 מיליון דולר. התעשייה האווירית באירופה קטנה בהרבה מזו שבארה"ב. בשנת 1987 החברות האמריקאיות McDonnell-Douglas, Boeing ו-Lockheed הוו יחדיו כ-82% מצי המטוסים של 600 חברות תעופה ברחבי העולם (להוציא מדינות קומוניסטיות). כ-50% מהמסוקים והמטוסים הקלים במערב אירופה הם מייצור מקומי. מקורן של חשאר בארה"ב [1,2].

תקנות תעופה חדשות בארה"ב שנכנסות לתוקף השנה (1990) מעלות את הדרישות מחומרים המשמשים בייצור חלקים פנימיים במטוסים מבחינת רעילותם, עמידותם לבעירה ופליטת העשן בעת בעירה. כיום רוב החלקים האלה עשויים מ-ABS ויש להחליפם. השוק שיוצר בעקבות כך הוא עצום, וחומרים פוטנציאליים למילוי הדרישות הם PEI/PC ופולימרים פולימיים [1,4].

טונות	10 ⁶ דולר	
1,000	2.08	PP/EPDM
800	3.12	PPE/PS
500	2.03	Mod. PA
500	1.30	ABS/PVC
200	0.78	ABS/PC
3,000	9.31	סה"כ

טבלה 12: צריכת הנתכים ותערובות במגזר התחבורה במערב אירופה בשנת 1987 [1].

בשוק האוטובוסים והמשאיות לא צפוי שינוי בצריכת הנתכים ותערובות. עקב התרבות המכשור האלקטרוני באוניות הצריכה של תערובות צפויה לעלות בכ-4% מדי שנה עד 1992. צריכת נתכים ותערובות בייצור רכבות הוא אפסי.

הצריכה הכוללת של נתכים ותערובות לשימושי תחבורה במערב אירופה צפויה לגדול ב-1992 ל-4,493 טונות בערך של 13.0 מיליון דולר. הגידול השנתי הממוצע בצריכה הוא 9%.

שימוש נוסף לנתכים ותערובות הוא בתחום הרפואה. עיקר השימוש הוא בייצור מארזים למכשור רפואי מתקדם כגון מכשירי רנטגן, אולטראסאונד ו-NMR. שימושים רפואיים אחרים הם לצנרת דיאליזה, קתטרים, משאבות אינסולין, מכונות הנשמה, מוניטורים למכשירי ECG ומיכלים סטריליים. צריכת הנתכים ותערובות בייצור מכשור רפואי בשנת 1987 היתה 1,100 טונות במערב אירופה בערך של 4.32 מיליון דולר ו-2,700 טונות בארה"ב בערך של 8.9 מיליון דולר [1,2]. טבלה 13 מציגה את החלוקה הגיאוגרפית (וכן לפי חברות) של שוק מכשירי ההדמיה הרפואיים בעולם בשנת 1986 על פי היקף המכירות.

החלוקה הגיאוגרפית בתוך אירופה בצריכת נתכים ותערובות לשימושים רפואיים היא 50% בהולנד, 30% במערב גרמניה ו-20% בבריטניה.

הדרישות העיקריות מחומרים המשמשים בייצור מכשור רפואי הן ראשית הגנת הרכיבים האלקטרוניים מנוק חיצוני, וכן שמירה מפני פליטת קרני רנטגן במכשירים מסוימים ומניעת פליטת וקליטת קרינת EMI/RFI. שני חומרים בלבד שמשו במגזר זה במערב אירופה ב-1987. 800 טונות PPE/PS בערך

של 3.12 מיליון דולר שמשו בדומה לתעשית מכונות משרדיות לייצור גופים וכן לייצור רכיבים פנימיים. 300 טונות ABS/PC בערך של 1.2 מיליון דולר שמשו בעיקר למכשור המוחזק ביד ולייצור משאבות אינסולין. הצריכה הצפויה ב-1992 לשני חומרים אלה היא 1,000 טונות ו-400 טונות בהתאמה, כאשר הגידול השנתי הממוצע בצריכה הוא כ-5%. שימוש ניסיוני נעשה בשנת 1987 ב-ABS/PSU כחומר לייצור בקבוקי האכלה הניתנים לעקור חוזר במים רותחים ללא אבוד הברק.

החברה	המדינה	מכירות \$ 10 ⁶	% מסך הכל
General Electric - Thomson CGR	ארה"ב - צרפת	2,402	29
Philips - Picker	הולנד - בריטניה	2,075	25
Siemens	מערב גרמניה	2,075	25
Toshiba	יפן	1,092	14
Hitachi	יפן	546	7
סה"כ		8,190	100

טבלה 13. החלוקה הגיאוגרפית וחלוקה לפי חברות של שוק מכשירי ההדמיה הרפואיים בעולם בשנת 1986 על פי היקף המכירות [1].

אחת הבעיות העומדות בפני נתכים ותערובות היא הדרישה לאישור מיוחד לשמש כחומרי גלם למוצרים רפואיים חד פעמיים. מאחר והרכב התערובות משתנה ממנה למנה רבות הן אלה שלא קבלו עדיין אישור כזה. בעיה נוספת היא הכמויות הקטנות יחסית המשמשות במגזר הרפואי אשר אינן מזכות בדרך כלל את הקונה בהנחה כלשהי.

ייצור אביזרי ספורט ופנאי במערב אירופה בשנת 1987 צרך 6,800 טונות נתכים ותערובות בערך של 27.7 מיליון דולר ו-2,100 טונות בארה"ב בערך של 11.1 מיליון דולר [1,2]. זהו אחד המגזרים הבודדים שבו הצריכה במערב אירופה עלתה על זה שבארה"ב. המוצרים הנכללים בקטגוריה זו הם רבים ומגוונים. כ-80% מהנתכים והתערובות במגזר משמשים במוצרים הסופגים תבטות ישירות כגון קסדות ואביזרי מיגון, חיילי כדורת (bowling pins), מחבטים וגלגלי אופניים. שימושים נפוצים נוספים הם למחלקיים וציוד דיג. בשנים האחרונות החלו יצרנים בדרום מזרח אסיה, וביחוד הונג קונג, טאיוון ודרום קוריאה, ליצר ברשיון מוצרי ספורט של חברות אירופאיות ידועות. עובדה זו פגעה כמובן בצריכת החומרים בשוק האירופאי המקומי.

רוב הצריכה (60%) היא של Mod PA, שאר המגזר מתחלק שווה בין PP/EPDM ו-Mod PC. כ-2% מהשוק תפוסים ע"י PC/PBT. החלוקה הגיאוגרפית של הצריכה בתוך אירופה בשנת 1987 מתוארת בטבלה 14. הצריכה הכוללת ב-1992 צפויה לגדול ל-9,300 טונות בגידול שנתי ממוצע של 7%.

מסך הכל	טונות	%
מערב גרמניה	2,100	31%
צרפת	1,200	18%
איטליה	1,100	16%
בריטניה	900	13%
שאר מערב אירופה	1,500	22%
סה"כ	6,800	100%

טבלה 14: צריכת הנתכים והתערובות לספורט ופנאי על פי חלוקה גאוגרפית במערב אירופה בשנת 1987 [1].

גם בייצור כלי עבודה (power tools) צרך השוק המערב אירופאי יותר נתכים ותערובות מהשוק האמריקאי. ייצור כלי עבודה במערב אירופה בשנת 1987 צרך 3,500 טונות נתכים ותערובות בערך של 15.8 מיליון דולר ו-2,300 טונות בארה"ב בערך של 9.0 מיליון דולר [1,2]. הכלים בקטגוריה זו מתחלקים למכונות חשמליות (בעיקר מקדחים ומשורים), מכונות הידראוליות ופנאומטיות ומכונות מונעות מנוע (כגון משורי שרשרת ומכסחי דשא). השימוש העיקרי בנתכים ותערובות היה בגופי המוצרים והווה 85% מהשימוש הכולל. שאר השימושים היו בייצור גלגלים, ידידות והילוכים.

הדרישה של יצרני כלי העבודה היא לחומרים עמידים לבעירה והסתדקות, קלים לעיבוד, עמידים לטמפרטורות גבוהות (120°C) וכן בעלי עמידות לדלקים - בעיקר בנוזן וסולר. החומרים בעלי התכונות המתאימות להחליף חלקי מתכת הם ABS/PA ו-PC/PBT.

טונות	% מסך הכל	
2,000	57%	Mod PA
600	17%	PP/EPDM
500	14%	ABS/PC
200	6%	ABS/PA
200	6%	PC/PBT
3,500	100%	סה"כ

טבלה 15: צריכת הנתכים והתערובות בייצור כלי עבודה במערב אירופה בשנת 1987 [1].

החלוקה הגיאוגרפית של צריכת נתכים ותערובות לייצור כלי עבודה בתוך אירופה בשנת 1987 מתוארת בטבלה 16. הצריכה הכוללת בשנת 1992 צפויה לגדול ל-4,600 טונות בגידול שנתי ממוצע של 6%.

טונות	% מסך הכל	
1,900	54%	מערב גרמניה
700	20%	בריטניה
400	11%	צרפת
300	9%	איטליה
200	6%	שאר מערב אירופה

טבלה 16: צריכת הנתכים והתערובות בייצור כלי עבודה על פי חלוקה גאוגרפית במערב אירופה

בשנת 1987 [1].

בנוסף למגורים הנ"ל קיימים שווקים פוטנציאליים נוספים לנתכים ותערובות. השוק הגדול ביותר לחומרים תרמופלסטיים הוא אריזה. ע"י שימוש בנתכים ותערובות ניתן לייצר אריזות לצרכים מיוחדים כגון עמידות בפני כימיקלים או עמידות לשחיקה חוזרת. תערובות עשויות להתאים גם לאריזות מזון. דוגמא אחת היא תערובת PET/PA המהווה מחסום כימי בפני חדירת חמצן לתוכן האריזה ומעלה באופן ניכר את אורך חיי המדף של המוצר הארוז [8]. גם ענף הבניה מציע אפשרויות שונות לחומרים מתקדמים עמידים לבעירה או בעלי שיעור נמוך של פליטת עשן.

חברות רבות ברחבי העולם עוסקות בהכנת מגוון רחב של נתכים ותערובות. טבלה 17 מציגה אחדים מהיצרנים המובילים בתחום זה וחלק מתוצרתם.

חברה	מדינה	נתכים ותערובות
Borg-Warner	ארה"ב	ABS/PC, ABS/PA, PPE/PA, ABS/PVC, PPE/PS
DuPont	ארה"ב	EPDM/PA, COPE/PBT, HDPE/PA, EVA/PVDC, Mod PA
General Electric	ארה"ב	PPE/PA, PPE/PBT, ASA/PVC, Mod PC/PBT, PBT/PC
Monsanto	ארה"ב	PP/EPDM, Mod PP, ABS/PA, ABS/PVC
Bayer/Mobay	מערב גרמניה	PBT/ABS, PC/PET, PC/ABS, Mod PC/PBT
BASF	מערב גרמניה	PC/ASA, PPE/PA, ABS/PC, PPE/PS, PC/PBT, PC/PET
ICI	בריטניה	LCP/PVC, LCP/PC, LCP/PPO, LCP/PES, Mod PA
Unitika	יפן	PAR/PA, PAR/PET
Teijin	יפן	PBT/PET, PBT/PC, Mod PC/PBT
Denka Kagaku	יפן	SMA/ABS

טבלה 17: אחדים מהיצרנים המובילים בעולם בייצור נתכים ותערובות וחלק מתוצרתם [1,3].

בגלל האטרקטיביות של חומרים אלה קיימת המגמה של יצירת התערובות במפעלים שיצרו עד כה שרפים בלבד. לאחרונה החליטו חברות Dow ו-Solvay להקים קוי ייצור לתרכוב על בסיס PP [9].

מקורות ספרות לפרק 3

- (1) Speciality Polymer Blends and Alloys; Western Europe - 1987, Kline & Company, INC.
- (2) Speciality Polymer Blends and Alloys; USA - 1987, Kline & Company, INC.
- (3) International Strategic Plastic Reports.
- (4) Plastics: A.D. 2000; Production and Use Through the Turn of the Century (1987).
- (5) Polypropylene Develops Further - in Blends, Copolymers, Compounds, Modern Plastics International, p. 61, March 1990.
- (6) Low-cost PP-based Resins Provide Competition for Engineering Materials, Modern Plastics International, p. 74, December 1989.
- (7) Olefinic TPEs for Auto Applications, Modern Plastics International, p. 59, February 1990
- (8) PET Blend Offered as Coex Alternative, Modern Plastics International, p. 19, February 1990.
- (9) Two Alliances in Plastic Compounding, Chemicalweek, January 3/10, 1990.

פרק 4. פולימרים תרמוסטיים (thermosets)

שרפים תרמוסטיים נמצאים כעת בתקופת בגרות כשקצב הגידול השנתי הצפוי עד שנת 2000 הוא פחות משני אחוז. ריכוז הצריכה של חומרים אלה בתעשיות בשלות כדוגמאת ענף הבניה ויצרני כלי שיט יתבטא בשינויים בדרישה משנה לשנה ללא עליה כוללת ניכרת. יישומים חדשים כוללים בעיקר חומרים מרוכבים מתקדמים. בעוד שליישומים אלה צפויה עליה בצריכת חומרים תרמוסטיים, צריכת חומרים אלה כשרפים תהיה קטנה מהנוכחית בעיקר בשל תחרות מצד חומרים תרמופלסטיים.

אפוקסי - על בסיס צריכתם ביישומים ותעשיות הגדלים במהירות, צפויה לשרפי אפוקסי קצב הגידול הגבוה מבין השרפים התרמוסטיים. למרות בשלותו של שוק הציפויים האפוקסיים, הוא צפוי להמשיך להיות צרכן האפוקסי העיקרי. צריכת תרכובות אפוקסי משוריינים ושרפים ליציקה צפויה להיות כפולה מזו של ה-GNP. בדומה לפולימרים הנדסיים תרמופלסטיים, חומרים מרוכבים על בסיס אפוקסי וכן דבקים ימצאו את מקומם כימורדי משקלי בתעשית הרכב ובתעשייה האווירית - הן האזרחית והן הצבאית. למרות השימוש הממוצע של כטונה וחצי חומר מרוכב בכל מטוס מסחרי, צפוי שהשימוש באפוקסי יוגבל עד סוף המאה לרכיבים לא-מבניים (nonstructural). בענף הרכב צפוי פיתוחם של 'עלים' לקפיצי הסוספנציה וכן של צירי תמסורת (drive shaft) עשויים אפוקסי. אפוקסי צפוי לתחרות מצד חומרים כגון פוליאמידים בשימוש בלוחות מעגלים מודפסים [1].

אלפי טונות		השימוש
1989	1988	
50	48	צבע
55	54	מכשירי חשמל
29	28	בניה, דבקים ואחרים
134	129	סה"כ
5	6	יצוא
139	135	סה"כ כללי

טבלה 1. השימוש באפוקסי ביפן בשנים 1988 ו-1989 [2].

אלפי טונות		
1989	1988	חשימוש
11	10	דבקים
11	11	ריצוף
90	81	ציפוי הבנה
26	25	למינטים חשמליים משוריינים
12	212	חומר משורין אחר
14	12	יציקה
207	193	סה"כ
17	18	יצוא
224	211	סה"כ כללי

טבלה 2: השימוש באפוקסי בארה"ב בשנים 1988 ו-1989 [3].

דבקים וציפויים	בניה	חשמל / אלקטי	שימוש תעשייתי	אחר	סה"כ
125	29.5	22.7	11.4	13.6	202.2
23.3%	1.2%	12.5%	10.2%	2.7%	

טבלה 3: הצריכה הצפויה לאפוקסי באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז

שיהווה השימוש באפוקסי מסך כל החומרים התרמוסטיים בכל מגזר [1].

פנוליים - השוק העיקרי לשרפים פנוליים ממשיך להיות ענף הבניה. השימושים הם לבידוד ודבקים. בגלל בשלות הענף, הגידול הכולל בצריכה לא יהיה גדול והשינויים משנה לשנה יושפעו מהתנדדות בענף הבניה. תרכובות פנוליים עומדים בתחרות קשה מצד פולימרים הנדסיים במגזרי הרכב, מוצרי הצריכה והרכיבים החשמליים. מאחר ופולימרים אלה כבר תפסו את מקום הפנוליים ביישומים שונים צפוי, שהדעיכה בצריכת הפנולים תואט [1].

הפנוליים הם החומר התרמוסטי הנצרך ביותר והוא כ-30% מסך צריכת התרמוסטיים בארה"ב בשנת

1985, וצפייה לחוות כ-27% בשנת 2000.

צריכה באלפי טונות				
יפן		ארה"ב		
1989	1988	1989	1988	השימוש
35	37	409	397	דבקים
105	101	100	97	למינטים
69	65	90	90	תרכובות לתבניות
-	-	740	720	דיקטי (plywood)
41	37	-	-	shell molding
129	117	77	77	אחר
379	357	1,426	1,381	סה"כ
-	-	10	10	יצוא
379	357	1,436	1,391	סה"כ כללי

טבלה 4: השימוש בפנולים בארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,3].

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר	סה"כ
45	1,090	29.5	45	13.6	6.8	13.6	63.5	136	1,443
8.4%	45.6%	16.3%	17.7%	2.8%	6.1%	53.8%	8.5%	26.5%	

טבלה 5: הצריכה הצפויה לפנולים באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז

שיהווה השימוש בפנולים מסך כל החומרים התרמוסטיים בכל מגזר [1].

מלמין ואוריאה - השמושים העיקריים של מלמין ואוריאה הם כדבקים, למינטים וקצפי בידוד בענף הבניה, הצורך כ-75% מחומרים אלה. בדומה לפנולים, לא צפוי גידול משמעותי בצריכה אשר תושפע מהתנודות השניות בענף הבניה. ב-1985 חזו מלמין ואוריאה כ-16% מסך כל התרמוסטיים שנצרכו בארה"ב, ושעור זה צפוי להשאר יציב עד שנת 2000 [1].

צריכה באלפי טונות				
יפן		ארה"ב		
1989	1988	1989	1988	חשימוש
478	499	498	556	דבקים
47	47	28	27	תרכובות לתבניות
32	33	79	88	צבעים וציפויים
46	45	7	8	אחר
603	624	612	679	סה"כ
-	-	9	10	יצוא
603	624	621	689	סה"כ כללי

טבלה 6: השימוש במלמין ובאוריאה בארה"ב ויפן בשנים 1988 ו-1989 [2,3].

מתוך טבלה 6 נראה כי מלמין ואוריאה הם מהחומרים הבודדים שצריכתם ב-1989 קטנה מזו שבשנת 1988, הן בארה"ב והן ביפן.

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	אריזה	אחר	סה"כ
79.4	613	79.5	18.1	25	18.1	11.4	844.5
14.8%	25.6%	43.8%	7.1%	5.1%	15.4%	2.2%	

טבלה 7: הצריכה הצפויה למלמין ולאוריאה באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים והאחוז שיהווה השימוש בחומרים אלה מסך כל החומרים התרמוסטיים בכל מגזר [1].

פוליאסטר בלתי-רווי - רוב השווקים לפוליאסטר בלתי-רווי בשלים ואינם צפויים לגידול משמעותי. רוב הגידול צפוי לשמושי פוליאסטר משורין. צריכת תרכובות לעיצוב חלקי רכב צפויה לגדול בתחילת ואמצע שנות התשעים. עם פיתוח שיטות העיבוד של פולימרים תרמופלסטיים, צפוי שאלה יתפסו חלקים גדלים והולכים של שוקי פולימרים תרמוסטיים. ב-1985 הווה פוליאסטר בלתי-רווי כ-14.3% מסך כל התרמוסטיים שנצרכו בארה"ב, ושעור זה צפוי לעלות לכ-16% בשנת 2000 [1].

צריכת פוליאסטר בלתי-רווי בלתי משורין ביפן היה 57,000 טונות ב-1988 ו-65,000 טונות ב-1989.

צריכת פוליאסטר בלתי-רווי משורין ביפן ב-1988 היה 181,000 טונות ו-199,000 טונות ב-1989 [2].

אלפי טונות		
1989	1988	השימוש
356	379	חומר משורין
75	82	יריעות משורינות
9	9	ציפויים
149	147	אחר
589	614	סה"כ
14	7	יצוא
603	624	סה"כ כללי

טבלה 8: השימוש בפוליאסטר בלתי-רווי בארה"ב בשנים 1988 ו-1989 [3].

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	תחבורה	אחר	סה"כ
25	306	43	34	27	25	340	91	891
4.7%	12.8%	23.8%	13.3%	5.6%	22.4%	45.3%	17.7%	

טבלה 9: הצריכה הצפויה לפוליאסטר בלתי-רווי באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגורים

שונים והאחוז שיהווה השימוש בפוליאסטר בלתי-רווי מסך כל החומרים התרמוסטיים

בכל מגזר [1].

פוליאוריתן - הפוליאוריתנים מהווים חלק ניכר משוק הפולימרים התרמוסטיים, הן כקצף קשיח והן כקצף גמיש. השימושים העיקריים לפוליאוריתן מוקצף גמיש הם בייצור רהיטים, כלי רכב, כלי מיטה ושטיחים. מגזר הרהוט חנו בשל ועל כן רגיש לתנאים הכלכליים השוררים ולמספר התחלות הבניה. בתחום ריפוד מושבי כלי רכב תיתכן ירידה קטנה בצריכה עקב המעבר לקצף בעל צפיפות נמוכה יותר. כ-80-85%

מהמיטות מאירופה הן בעלות תחתית פוליאוריתן ואילו בארה"ב רק לכ-10% מהמיטות תחתית כזו. נתונים אלה מצביעים על שוק פוטנציאלי גדול. צריכת פוליאוריתן לייצור שטיחים צפויה לעלות בעוד הצריכה לאריזה ולטקסטיל תשאר קטנה.

הדרישה העיקרית לפוליאוריתן מוקצת קשיח היא בענף הבניה ובבידוד במכשירי חשמל ביתיים. צריכת פוליאוריתן לבניה צפויה לגדול בשנים בעלות צמיחה כלכלית חיובית בכ-4-3%. מוצרים אחרים תלויים במצב הכלכלי הכולל וצריכתם אינה צפויה לגדול ביותר מ-3-2%. ב-1985 חוזה פוליאוריתן כ-26.8% מסך כל התרמוסטים שנצרכו בארה"ב, ושעור זה צפוי להשאר יציב גם בשנת 2000 [1].

אלפי טונות		
1989	1988	השימוש
65	81	קצף גמיש: כלי מיטה
318	298	רהוט
146	146	שטיחים
191	182	תחבורה
66	64	אחר
186	771	סה"כ קצף גמיש
205	236	קצף קשיח: בידוד לבניה
73	77	בידוד לקירור
41	43	בידוד תעשייתי
31	30	אריזה
22	21	תחבורה
21	21	אחר
393	428	סה"כ קצף קשיח
95	83	RIM elastomers
52	49	Cast elastomers
150	138	אחר
1476	1469	סה"כ כללי

טבלה 10: השימוש בפוליאוריתן בארה"ב בשנים 1988 ו-1989 [3].

אלפי טונות		
השימוש	1988	1989
קצף גמיש	571	586
קצף קשיח למחצה לתעשית הרכב	79	88
קצף קשיח למחצה לסוליות נעליים	61	61
קצף קשיח	438	473
אחר	273	300
סה"כ	1422	1508

טבלה 11: השימוש בפוליאוריתן בארופה בשנים 1988 ו-1989 [4].

דבקים וציפויים	בניה	מוצרי צריכה	חשמל / אלקטי	רהיטים	שימוש תעשייתי	אריזה	תחבורה	אחר	סה"כ
*	272	6.8	95.3	409	34	68.1	322	204	1,411
*	11.4%	3.7%	37.2%	84.1%	30.6%	57.7%	42.9%	39.8%	

טבלה 12: הצריכה הצפויה לפוליאוריתן באלפי טונות בארה"ב בשנת 2000 לפי מגזרים שונים

והאחוז שיהווה השימוש בפוליאוריתן מסך כל החומרים התרמוסטטים בכל מגזר (* כלול

בקטגוריה 'אחר') [1].

ההערכה היא כי 38% מהפוליאוריתן בעולם נצרכים במערב אירופה, 34% בצפון אמריקה, 10% ביפן

ו-18% בשאר העולם [5].

מקורות ספרות לפרק 4

- (1) *Plastics: A.D. 2000; Production and Use Through the Turn of the Century* (1987).
- (2) *Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Japan*, Modern Plastics International, pp. 33 - 34, January 1990.
- (3) *Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - United States of America*, Modern Plastics International, pp. 35 - 44, January 1990.
- (4) *Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Western Europe*, Modern Plastics International, pp. 31 - 32, January 1990.
- (5) J. M. Juist, *Polyurethanes - the All Purpose Polymers?*, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, pp. 47 - 51, 1989.

פולימרים נחונים במגוון רחב של תכונות הניתנים לניצול בישומים שונים, אולם חומרים אלה אינם מתאימים בד"כ לנשיאת מעמסים ולמטרות מבניות. הפתרון הוא שריון ע"י סיבים המשפרים את החוזק, הצפיפות, הקשיחות והעמידה לתופעות זחילה. כשלושים שנה עברו מאז חומרים פלסטיים משורייני זכוכית E-glass ופוליאסטר קבלו אופי מסחרי בקנה מידה תעשייתי גדול. מטריצות של שרפים פולימריים משוריינים בסיבי זכוכית מהווים כיום את הקבוצה הגדולה ביותר מבין החומרים המרוכבים הודות לשילוב של תכונות מכניות וכימיות טובות ומחירם הנמוך יחסית. אם סיבי החומר המשרין מסודרים בשכבות מקבילות החומר המשרין נקרא למינט (laminate). אם הסיבים האלה קצרים מאוד (ובד"כ ללא כוונות אחידה) ניתן לעבד את החומר המרוכב בחזקה. ישנן גם טכנולוגיות המאפשרות קבלת מרוכבים המכילים סיבים קצרים מכוונים.

רוב העלות של חומר מרוכב מורכב מחומרי הגלם ועלות הכנת הסיבים, שעבור מרוכבי גרפיט עשוי להגיע לעד 80% מסך העלות. עלויות עתידיות צפויות לרדת הודות לגורמים המתייחסים לעליה בנפח היצור והתפתחות טכנולוגיות הכנת הסיבים ויצור המרוכב הסופי.

נתונים שפורסמו לאחרונה ע"י איגוד יצרני הפלסטיקה בארה"ב (SPI) מורים כי השנה החולפת לא היתה מן המוצלחות עבור תעשיית החומרים הפלסטיים המשוריינים. המכירות של חומרים מרוכבים פלסטיים (תרמופלסטיים ותרמופלסטיים) ירדו בשנת 1989 ב-2.6% לעומת השנה הקודמת, וזאת לאחר חמש שנים בעלי גידול שנתי ממוצע של כמעט 7% בצריכת חומרים מרוכבים. עם זאת, בשנת 1989 יוצרו בארה"ב כ-1.175 מיליון טונות של חומרים מרוכבים שנקלטו במספר גדל והולך של יישומים בענפי הבטחון, ההנדסה, הפנאי והמכונות המשרדיות, בערך כולל של כעשרים מיליארד דולר. המצב באירופה נראה טוב יותר עם תפוקה של 1.1 מיליון טונות וגידול שנתי ממוצע של 9%. טבלה 1 מסכמת את צריכתם של חומרים מרוכבים פלסטיים לפי מגזרי שוק בארה"ב בשנים 1984-1989 באלפי טונות.

לפי טבלה 1 נראה כי במשך שש השנים האחרונות היו תנודות בצריכת מרוכבים פלסטיים במגזרים השונים בארה"ב. שני המגזרים בעלי התנודות הגדולות הן ענף הבניה והמכשור העמיד בקרוויזיה. התחזית לשנת 1990 צופה עליה של 1.5% לצריכה כוללת של 1.2 מיליון טונות בארה"ב. המגזרים הצפויים לגידול משמעותי יותר הם מגזר המכונות המשרדיות ומגזר החשמל/אלקטרוניקה. בנית רכב ה-GM-200 APV ע"י

חברת General Motors השפיע רבות על צריכת מרוכבים ע"י תעשית הרכב, וצפויה כאן עליה של 2.4% בשנת 1990 ל-318,000 טונות. גם חברות Ford ו-Chrysler משתמשות בחומרים מרוכבים בבנית כלי רכב. התעשייה האווירית ותעשית הבטחון צפויות לצרוך 2.2% יותר חומרים מרוכבים בשנת 1990 מאשר ב-1989. חלק מעליה זו תנבע מבנית מטוס הקרב ARES וחלקי תא הטיס במטוסי Boeing. רוב החומרים המרוכבים הנצרכים ע"י התעשייה האווירית הם מרוכבים מתקדמים, שלהם ייחוד סעיף נפרד. צריכת המרוכבים הפלסטיים ע"י ענף הבניה בארה"ב בשנת 1990 צפויים לעלות בכ-0.7% ל-218,000. שימושים חדשים כוללים מבנים על טהרת חומרים מרוכבים השקופים להפרעות אלקטרומגנטיות (EMI) הנבנים ע"י יצרני מחשבים למטרת בדיקת ציוד רגיש [1].

אלפי טונות						מגזר חשוק
1989	1988	1987	1986	1985	1984	
18.59	17.68	16.33	16.78	14.51	13.5	חלל/מטוסים/בטחון
68.94	68.04	63.95	62.13	60.32	55.78	מכשירי חשמל ומכו"משרדיות
217.23	224.48	229.47	206.80	201.81	195.02	בניה
73.47	76.64	75.74	67.57	64.40	64.85	מוצרי צריכה
158.28	158.28	149.21	131.97	133.79	140.59	מכשור עמיד בקורוזיה
104.76	104.32	97.05	91.16	86.62	85.72	חשמל/אלקטרוניקה
186.85	204.99	187.30	154.20	151.93	140.14	ספנות
310.66	315.19	297.51	265.31	255.33	244.89	תחבורה
35.37	36.28	34.01	37.64	37.19	36.28	אחר
1,174.15	1,205.90	1,150.57	1,033.56	1,005.90	976.42	סה"כ

טבלה 1: צריכת חומרים מרוכבים פלסטיים לפי שווקים בארה"ב ב-1989-1984 באלפי טונות [1].

רוב החומרים המרוכבים הפלסטיים משתמשים במטריצה תרמוסטית (בעיקר אפוקסי ופוליאסטר) כבסיס, אולם חלקם של המרוכבים התרמופלסטיים גדל והולך בעיקר בגלל הקלות היחסית של העיבוד. טבלה 2 מסכמת את צריכת השרפים התרמופלסטיים ששמשו לחומרים מרוכבים בארה"ב ב-1988 ו-1989.

1989	1988	חומר
80	77	נילון (PA)
30	27	פוליקרבונט (PC)
88	84	פוליאסטר (PET)
84	77	פוליפרופילן (PP)
24	23	PS, ABS, SAN, SMA
18	17	אחר
324	305	סה"כ

טבלה 2: צריכת השרפים התרמופלסטיים ששמשו לחומרים מרוכבים בארה"ב ב-1988 ו-1989

באלפי טונות [2].

גם במערב אירופה מהווה מגזר התחבורה את הצרכן הגדול ביותר של המרוכבים הפלסטיים, כפי

שעולה מטבלה 3 המסכמת את צריכת החומרים הפלסטיים המשוריינים באירופה ב-1988 ו-1989.

1989	1988	מגזר השוק
66	62	ספנות
174	161	בניה
122	113	מוצרי צריכה
229	212	שימושים חשמליים
105	96	רכיבים תעשייתיים
105	97	צנרת ומיכלים
282	255	תחבורה
90	83	אחר
1,173	1,073	סה"כ

טבלה 3: צריכת חומרים מרוכבים פלסטיים לפי שווקים במערב אירופה ב-1988-1989 באלפי

טונות [3].

דו"ח של חברת Frost and Sullivan מגלה כי 35% מהמרוכבים הפלסטיים באירופה נמכרים במערב גרמניה. אותו מקור צופה גידול כלל אירופאי של 30% בצריכה בתקופה 1989-1994.

התפתחות תעשיית המרוכבים הפלסטיים בטאיון דומה לזו שבמדינות המערב המתועשות. תחילת הענף בעיבוד מוצרים מרוכבים בשנת 1966, שבעקבותיו יוצרו חומרי הגלם עצמם ולבסוף אף חומרים מרוכבים מתקדמים. התפתחות זו לוותה במחקר ופיתוח מעמיק במוסדות מחקר ופיתוח אקדמיים ותעשייתיים. ישנם חמישה יצרני סיבים בטאיון, בעלי יצור שנתי של 58,000 טונות. ישנם עשרה יצרני פוליאסטר המיצרים יחד כ-78,000 טונות בשנה ושני יצרני אפוקסי בעלי קבולת משותפת של 35,000 טונות בשנה. קבולת היצור של יצרן סיבי הפחמן היחיד הוא 240 טונות בלבד. ספקי חומרי הגלם עומדים בדרישות השוק המקומי פרט לסיבי הפחמן.

סך מוצרי המרוכבים הפלסטיים בטאיון ב-1988 היה 41,000 טונות. המוצרים העיקריים הם יאכטות, סירות דיג, אמבטיות ופנלים למגדלי קירור. בתחום מוצרי הספורט, טאיון היא אחת מהיצרנים העיקריים של מחבטי טניס, חקות דיג ומקלות גולף. בשנת 1988 400 טונות של סיבי פחמן שמשו ליצור ציוד ספורט בערך של 320 מיליון דולר. 15,000 טונות של סיבי זכוכית משמשים למרוכבים עבור מעגלים מודפסים בתעשיית האלקטרוניקה. לאחרונה הודות לעידוד הכספי של גורמים ממשלתיים, מו"פ באוניברסיטאות ובתעשייה והשתלמויות טכניות במרכז הטאיוני לחומרים מרוכבים, החלה טאיון לחזור לשוק המרוכבים המתקדמים.

תעשיית המרוכבים בטאיון שהחלה כמספר חברות בודדות ב-1966, מונה כיום 450 חברות המעסיקות יותר מ-30,000 עובדים המיצרים יותר מ-1,000 מוצרים שונים. קצב הגידול השנתי הממוצע של מרוכבים בשנות השמונים היה 11%. ישנם שמונה מוסדות מחקר ו-10 אוניברסיטאות העוסקות במחקר ופיתוח של חומרים מרוכבים. סך המכירות הצפויות בשנת 2000 מגיע לארבעה ביליון דולר.

קצב הגידול של מרוכבים תרמופלסטיים והנדסיים הוא גבוה מאוד, והממוצע לשנים האחרונות הוא כ-40%. הצריכה בשנת 1988 היתה 16,000 טונות PA, PBT, PET, ABS, PC, PPO ו-PP. 80% מהמרוכבים התרמופלסטיים וההנדסיים מיובאים לטאיון [5].

1989	1988	חומר
80	77	נילון (PA)
30	27	פוליקרבונט (PC)
88	84	פוליאסטר (PET)
84	77	פוליפרופילן (PP)
24	23	PS, ABS, SAN, SMA
18	17	אחר
324	305	סה"כ

טבלה 2: צריכת השרפים התרמופלסטיים ששמשו לחומרים מרוכבים בארה"ב ב-1988 ו-1989 באלפי טונות [2].

גם במערב אירופה מהווה מגזר התחבורה את הצרכן הגדול ביותר של המרוכבים הפלסטיים, כפי שעולה מטבלה 3 המסכמת את צריכת החומרים הפלסטיים המשוריינים באירופה ב-1988 ו-1989.

1989	1988	מגזר השוק
66	62	ספנות
174	161	בניה
122	113	מוצרי צריכה
229	212	שימושים חשמליים
105	96	רכיבים תעשייתיים
105	97	צנרת ומיכלים
282	255	תחבורה
90	83	אחר
1,173	1,073	סה"כ

טבלה 3: צריכת חומרים מרוכבים פלסטיים לפי שווקים במערב אירופה ב-1988-1989 באלפי טונות [3].

דו"ח של חברת Frost and Sullivan מגלה כי 35% מהמרוכבים הפלסטיים באירופה נמכרים במערב גרמניה. אותו מקור צופה גידול כלל אירופאי של 30% בצריכה בתקופה 1989-1994.

התפתחות תעשית המרוכבים הפלסטיים בטאיון דומה לזו שבמדינות המערב המתועשות. תחילת הענף בעיבוד מוצרים מרוכבים בשנת 1966, שבעקבותיו יוצרו חומרי הגלם עצמם ולבסוף אף חומרים מרוכבים מתקדמים. התפתחות זו לוותה במחקר ופיתוח מעמיק במוסדות מחקר ופתוח אקדמיים ותעשיתיים. ישנם חמישה יצרני סיבים בטאיון, בעלי יצור שנתי של 58,000 טונות. ישנם עשרה יצרני פוליאסטר המיצרים יחד כ-78,000 טונות בשנה ושני יצרני אפוקסי בעלי קבולת משותפת של 35,000 טונות בשנה. קבולת היצור של יצרן סיבי הפחמן היחיד הוא 240 טונות בלבד. ספקי חומרי הגלם עומדים בדרישות השוק המקומי פרט לסיבי הפחמן.

סך מוצרי המרוכבים הפלסטיים בטאיון ב-1988 היה 41,000 טונות. המוצרים העיקריים הם יאכטות, סירות דיג, אמבטיות ופנלים למגדלי קירור. בתחום מוצרי הספורט, טאיון היא אחת מהיצרנים העיקריים של מחבטי טניס, חקות דיג ומקלות גולף. בשנת 1988 400 טונות של סיבי פחמן שמשו ליצור ציוד ספורט בערך של 320 מיליון דולר. 15,000 טונות של סיבי זכוכית משמשים למרוכבים עבור מעגלים מודפסים בתעשית האלקטרוניקה. לאחרונה הודות לעידוד הכספי של גורמים ממשלתיים, מו"פ באוניברסיטאות ובתעשייה והשתלמויות טכניות במרכז הטאיוני לחומרים מרוכבים, החלה טאיון לחדור לשוק המרוכבים המתקדמים.

תעשית המרוכבים בטאיון שהחלה כמספר חברות בודדות ב-1966, מונה כיום 450 חברות המעסיקות יותר מ-30,000 עובדים המיצרים יותר מ-1,000 מוצרים שונים. קצב הגידול השנתי הממוצע של מרוכבים בשנות השמונים היה 11%. ישנם שמונה מוסדות מחקר ו-10 אוניברסיטאות העוסקות במחקר ופתוח של חומרים מרוכבים. סך המכירות הצפויות בשנת 2000 מגיע לארבעה ביליון דולר.

קצב הגידול של מרוכבים תרמופלסטיים והנדסיים הוא גבוה מאוד, והממוצע לשנים האחרונות הוא כ-40%. הצריכה בשנת 1988 היתה 16,000 טונות PA, PBT, PET, ABS, PC, PPO ו-PP. 80% מהמרוכבים התרמופלסטיים וההנדסיים מיובאים לטאיון [5].

מגזר השוק	1983	1984	1985	1986	1987	1988
סירות ויאכטות	11,800	12,900	13,950	16,040	17,600	16,720
בניה	7,500	7,600	7,600	8,700	8,900	9,900
שמושים תעשיתיים	3,700	4,500	5,200	6,000	7,100	8,900
שימושים מכניים וחשמליים	890	1,140	1,250	1,500	1,700	2,280
רכב ותחבורה	230	250	290	410	450	500
ספורט ופנאי	660	820	1,040	1,310	1,750	1,700
אחר	430	520	610	720	900	1,000
סה"כ	25,210	27,730	29,940	34,680	38,400	41,000

טבלה 4: צריכת חומרים מרוכבים פלסטיים לפי שווקים בטאיון ב-1983-1988 באלפי טונות [5].

חומרים מרוכבים מתקדמים (advanced composites, AC) - חנים שילובים שונים של חומרים פלסטיים, מתכתיים או קרמיים עם חומרים בעלי חוזק גבוה בצורת סיבים או כפאזה רציפה. חומרים משריינים עיקריים הם גרפיט, בורון, זכוכית, אראמיד וחומרים קרמיים. בתחילה, חומרים מרוכבים מתקדמים שמשו בעיקר לצרכים צבאיים ובמיוחד לחלקי כלי טיס ומרכיבים שונים ששולחו לחלל. כיום, הודות להתפתחויות טכנולוגיות, תחום הישומים של חומרים מרוכבים הוא רחב הרבה יותר. אנו נתייחס בסקירה הנוכחית לחומרים מרוכבים על בסיס מטריצה פולימרית.

סקר של חברת Kline & Company Inc. מצביע על עתיד דינמי לחומרים מרוכבים מתקדמים פולימריים. הצריכה העולמית צפויה לעלות מ-13,200 טונות בשנת 1987 לכ-50,000 טונות בשנת 1996. נתון זה מייצג גידול שנתי ממוצע של כ-14%. רוב הגידול צפוי במגזר התעשייה האווירית (aerospace) שיעלה מצריכת כ-38% מסך הצריכה בשנת 1987 לכמעט 66% בשנת 1996. השוק השני בגודלו הוא מגזר הספורט והפנאי (recreational) שמוצריו הכוללים מחבטי טניס, מחלקיים לסקי, חקות דייג ומקלות גולף הוו כ-31% מהשוק בשנת 1988. השוק השלישי בגודלו הוא שימושים תעשייתיים הכוללים גלגלי שיניים, מערכות תמסורת, חלקים נעים וכלי עבודה. למרות גודלו של ענף התחבורה, רק 4% מהחומרים המרוכבים נצרכים על ידו, ובכלל זה תעשיית הרכב. מעט מאוד חומר מרוכב משמש בייצור מכוניות, וזאת בגלל המחיר הגבוה המגיע לכדי \$30 לק"ג. השימושים המעטים כוללים את ציר ההנעה (drive shaft) ועלילים לקפיצי מערכת הסוספנציה.

סיבי פחמן, שהם יקרים יותר, מהווים כ-40% משוק הסיבים המשריינים (במונחים דולריים). סיבי זכוכית מהווים כשליש מהשוק וסיבי ארמיד כרבע. באופן כללי מחיר הסיב עולה אקספוננציאלית כתלות בחוזק המתיחה ובמודולוס [6].

הפחתת המשקל בכלי רכב צבאיים וטנקים מוכרת עתה כגורם חשוב במערכות עתידיות. המצב דומה גם בכלי שיט וצוללות. נסיונות שנערכו ע"י צבא ארה"ב גילו כי רכב משוריין עשוי כולו מחומרים מרוכבים אינו נופל מרכב משוריין עשוי מתכת. משקלו של רכב עשוי חומר מרוכב קטן ב-40% מזה של רכב קתבנציונלי, יכולת המיגון שלו דומה וקל יותר לתקן אותו [7].

חומרים מרוכבים על בסיס אפוקסי/גרפיט משמשים בייצור כלי טיס צבאיים מעל 15 שנה. חומרים אלה מהווים 10% ממשקלם של מטוסי הקרב F-16 ו-F-18. למטוס ה-AV-8B כנף העשוי כולו אפוקסי/גרפיט ולמטוס B-1 מרכיבים שונים עשויים מחומר מרוכב זה. בהתאם לסקר של חברת Skeist Lab Inc, כ-40-60% ממטוסי העתיד יהיו עשויים מאפוקסי/גרפיט. הנסיון שהצטבר בתכנון וייצור הפכו את החומר אפוקסי/גרפיט לסטנדרד תעשייתי לעבודה בטמפרטורות עד 180°C. בהתאם לכך החומר המרוכב משמש גם בייצור מטוסים אזרחיים מסחריים, בנוסף לשימושים שונים בתעשייה ובייצור מוצרי ספורט ופנאי.

חוזק ומודולוס גבוהים הפכו חומרים מרוכבים על בסיס Kevlar (ארמיד) למתחרה חזק של חומרים המכילים גרפיט. על בסיס נפחי, השימוש בסיבי ארמיד בתעשייה האווירית עולה על השימוש בסיבי גרפיט. Kevlar 29 משמש בעיקר לישומים בליסטיים ו-Kevlar 49 משמש לרכיבים מבניים. חומרים מרוכבים על בסיס Kevlar משמשים במרכיבים משניים לא-מבניים במטוסי Boeing 757 ו-767 וכן במטוסים אחרים. כמויות גדולות יחסית משמשות במיכלי לחץ המיוצרים ע"י fillament winding ובמיכלי מנוע לטילים.

חומרים מרוכבים על בסיס בורון משמשים בישומים בהם נדרש חוזק מתיחה חד-צירי (uniaxial) גבוה. חסרונם הוא מחירם הגבוה מאוד וכושר העיבוד הנמוך שלהם יחסית למרוכבים המכילים גרפיט. על מנת להוריד מחירים, משתמשים לעתים בתערובת סיבי בורון וגרפיט. בורון/אפוקסי משמש במייצבים האופקיים במטוס ה-F-14, בזנב ה-F-15 ובחלקים של מטוס ה-B-1B ומסוק ה-VH-60 של חברת סיקורסקי. כמויות קטנות משמשים לחקת דיג, מחבטי טניס ומחבטי סקווש.

סיבי זכוכית ('פיברגלס') הינם המשריין הנפוץ ביותר לחומרים מרוכבים על בסיס מטריצת שרף. רוב הסיבים הם מסוג E-glass. סיבי זכוכית S-glass המכילים פחות סידן והנחונים בחוזק מתיחה גבוה משמשים במרוכבים מתקדמים. אלה פותחו ראשית ע"י Owens Corning Fiberglass בחוזה עם צבא ארה"ב. חוזק המתיחה עולה על זה של בורון וגרפיט ונמוך מזה של Kevlar 49. סיבים אלה הם הזולים מבין כל הסיבים המשריינים. חסרונם הוא במודולוס הנמוך ובעמידות נמוכה להתעיפות. E-glass משמש לשריון חומרים תרמופלסטיים. S-glass משמש בשילוב אפוקסי בעיקר לצרכים צבאיים ובתעשייה האווירית. שימוש נוסף הוא בחקות דייג ובמיכלי לחץ [8].

התפתחויות חדשות בשרפי המטריצה הפולימריים יתבטאו גם בחומרים מרוכבים. טמפרטורות העבודה של סוגים חדשים של פוליאמיד מתקרבת ל- 370°C . חומרים דוגמאת אלה צפויים למצוא שימושים במטוסים כגון ה-Advanced Tactical Fighter וה-National Aero-Space Plane הודות למהירויות הטיסה הגבוהות [6]. התקדמות נוספת צפויה הודות לפיתוחם של סיבי-על (super-fibers) עשויים PBO, PBT ו-PE [7]. בשנים האחרונות פותחו שרפים תרמופלסטיים שיתרונם בצפיפות הגבוהה, עמידות לאורך זמן ועמידות טובה יותר בהשוואה לחומרים תרמוסטיים.

התפתחויות עתידיות תהיינה בתחומי סיבים, שרפים, סוגים חדשים של חומרים מרוכבים (מרוכבים מולקולריים) ובטכנולוגית העיבוד. המטרות במחקר ופיתוח הן שיפור תכונות החומרים והורדת המחירים. פיתוחם של סיבים בעלי חוזק ומודולוס גבוהים פותחים אפשרויות לשווקים חדשים לחומרים מרוכבים. בנוסף ל-Kevlar 49 של חברת Du Pont פותחו סיבי ארמיד אחרים בעלי חוזק מתיחה גבוה וחוזק לחיצה נמוך. דוגמאות לאלה כוללים Twaron של חברת Teijin Technola היפנית, HM-50 של AKZO ההולנדית וכן סיבי פוליאטילן וסיבי PBT/PBO. שיפור תכונות הלחיצה של סיבים בא לעתים על חשבון תכונות אחרות, ומעלה את עלות הסיבים [7].

קיים קשר הדוק בין מחיר החומר המרוכב לבין העמידות התרמית. בעוד מחיר חומרי הגלם (ובעיקר הסיבים) מהווה גורם המגביל את השתלבותם של חומרים מרוכבים, אחת הבעיות העיקריות היא העיבוד של חומרים פולימריים בעלי עמידות לטמפרטורות גבוהות. טכניקות העיבוד הנוכחיות אינן מתאימות לייצור בקנה מידה גדול; על כן יש צורך לפתח טכניקות ייצור יעילות ומהירות. זוהי גם אחת הסיבות לייצור חומרים מרוכבים על בסיס תרמופלסטי.

חברות רבות מאמינות כי המפתח להצלחה היא אינטגרציה אנכית (vertical integration). מספר גדול של רכישות בוצעו בשנים האחרונות, וישנן כעת מספר חברות גדולות המסוגלות לספק לצרכן מערכות שלמות של חומרים מרוכבים, החל מחומרי גלם וכלי ברכיבים. ענף החומרים המרוכבים המתקדמים הפולימריים הינו ענף כלל-עולמי המצריך לעתים שימוש בטכנולוגיות זרות על מנת להיות בר-תחרות. האפשרות של הקמת מפעלים משותפים (joint ventures) עם ספקים זרים מעניקה בנוסף לגישה לטכנולוגיה זרה גם גישה לשווקים זרים [6]. תחזית של חברת Frost and Sullivan המתארת את התפלגות הצריכה של מרוכבים מתקדמים בארה"ב בשנת 1992 צופה את המצב הבא: מוצרי צריכה - 4,490 טונות, תחבורה - 5,630 טונות, מטוסים אזרחיים - 6,540 טונות, ציוד תעשייתי - 7,670 טונות, שימושים צבאיים (פרט למטוסים) ושימושי חלל - 9,850 טונות ומטוסים צבאיים - 15,900 טונות. סה"כ צריכה של 50,000 טונות [9]. נתון זה אינו מתישב עם התחזית של כחברת Kline and Company Inc. שכזכור צפתה צריכה כלל-עולמית כזו רק ב-1996.

שתי הטבלאות הבאות המתארות את התפלגות צריכת מרוכבים מתקדמים על פי איזור גאוגרפי ומגזרי שוק מבוססות על נתונים של Suppliers of Advanced Composite Materials Assn. (SACMA) [10], וחברת Kline [11].

2015	2000	1989	1986	
50	55	58	58	ארה"ב
22	20	21	23	אירופה
28	25	21	19	אסיה

טבלה 5: צריכת חומרים מרוכבים מתקדמים עפ"י אזור גאוגרפי. הנתונים הם באחוזים [10], [11].

2015	2000	1989	1986	
40	50	44	55	תעשייה אווירית
10	20	34	28	ציוד ספורט ופנאי
50	11	15	17	תעשייה
	5	2		תחבורה
	13	11		אחר

טבלה 6: צריכת חומרים מרוכבים מתקדמים על פי מגזרי שוק. הנתונים הם באחוזים [10], [11].

טבלה מס. 7 מתארת את צריכת החומרים המרוכבים לפי טכנולוגית השימוש. עקב העובדה שהתעשייה האווירית היא מגזר השוק הגדול ביותר, טכנולוגית ההנחה הידנית היא הנפוצה ביותר כיום, אך קצב הגידול השנתי של טכנולוגיה זו הוא נמוך יחסית, במיוחד בהשוואה להנחה אוטומטית שתלך ותתפוס את מקומה.

טכנולוגיה		צריכה-אלפי טון		היקף כספי-מליון \$		גידול שנתי ממוצע-%	
	1989	1999	1989	1999	כמות	ערך	
הנחה ידנית	8.5	15.8	3,050	5,600	6.5	6.3	
ליפוף סיבים	1.9	4.8	205	500	9.3	9.3	
ליווח	1.8	4.6	120	275	9.6	8.6	
הנחה אוטומטית	0.4	1.9	190	950	17.2	17.5	
פולטרוזיה	0.4	1.2	25	100	11.6	14.7	
אחר	2.3	5.8	300	875	9.8	11.3	
סה"כ	15.3	34.1	3,890	8,300	8.3	7.9	

טבלה 7: צריכת חומרים מרוכבים מתקדמים על פי טכנולוגיות שימוש [11].

טבלה מס. 8 מסכמת את צריכת החומרים המרוכבים לפי סוג הסיב. חומרים מרוכבים על בסיס סיבי גרפיט מהווים את החלק הגדול ביותר של השוק וכך יהיה הדבר גם לקראת שנת 2000. קצב של חומרים מרוכבים על בסיס ווראמיד ישמרו ברמה של 7.7% ואילו זה על בסיס סיבי זכוכית-S יגיע לקצב גידול של 8.6 %.

סוג סיב	צריכה-אלפי טון		היקף כספי-מליון \$		גידול שנתי ממוצע-%	
	1989	1999	1989	1999	כמות	ערך
גרפיט	8.6	18.8	3,095	6,570	8.1	7.8
אראמיד	3.5	7.5	455	930	7.7	7.4
זכוכית-S	3.0	6.9	245	465	8.6	6.6
אחר	0.2	0.9	95	335	15.2	13.4
סה"כ	15.3	34.1	3,890	8,300	8.3	7.9

טבלה 8: צריכת חומרים מרוכבים לפי סוג הסיב [11].

- (1) What Message from the US slump?, European Plastics News, pp. 37 - 39, April 1990.
- (2) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - United States of America, Modern Plastics International, pp. 35 - 44, January 1990.
- (3) Modern Plastics International Special Report - Materials '89 - Western Europe, Modern Plastics International, pp. 31 - 32, January 1990.
- (4) Reinforced Plastics in Europe, Advanced Composites Bulletin, Vol. 2 No. 4, p. 6, 1989.
- (5) R. C. Chang, J. Chao and C. M. Ma, Trends and Development of Composites Industry in Taiwan, R.O.C., in FRP CON-EX '89, pp. 280 - 294, The Japan Reinforced Society, 1989.
- (6) The Status and Future for Advanced Polymer Composites, Materials and Processing Report, pp. 1 - 2, May 1988.
- (7) T. J. Reinhart, Polymer Matrix Composites, Advanced Materials & Processes, pp. 33-34, January 1990.
- (8) S. Kenig, Internal Report (1982).
- (9) US Composites Market, Advanced Composites Bulletin, Vol. 2 No. 4, p. 5, 1989.
- (10) J. McDermott, The Structure of the Advanced Composite Industry, Advanced Composites - 1990 Bluebook, pp. 9 - 22, 1990.
- (11) Kline, Fabrication Technologies for Advanced Polymer Composites, 1989.

פרק 6: חומרים חדשים

התפתחות התעשייה הפלסטית העולמית היא מרשימה ביותר. היצור של חומרים פלסטיים בקנה מידה תעשייתי החל בשנות השלושים עם ייצורם של פולימרים על בסיס סטירן, ויניל כלוריד ואתילן. התפוקה העולמית אז היתה כ-100,000 טונות לשנה. במשך כארבעים שנה גדלה התעשייה באופן משמעותי והכפילה עצמה מדי חמש שנים. 1973 היתה שנת שיא בה יוצרו מעל 40 מיליון טונות חומר פלסטי, כ-90% מכמות זו יוצרו בארה"ב, יפן ומערב אירופה. לאחר מספר שנים של מיתון כמות זו כמעט והוכפלה שוב והגיעה לכ-77 מיליון טונות ב-1986. עם השבחת תכונות הפולימרים הפכו חומרים פלסטיים מתחרים רציניים לחומרים מסורתיים כמו זכוכית ונייר. הופעת פולימרים הנדסיים ובכללם חומרים מרוכבים, נתכים ותערובות הביאה להחלפת מתכות ביישומים שונים. ב-1986 נתכים ותערובות הוו כבר כחמישית משוק החומרים התרמופלסטיים, ומאז 1980 קצב החדרת נתכים ותערובות לשוק הוא פי ארבע מזה של פולימרים חדשים [1]. את ההתקדמות הטכנולוגית בתחום החומרים הפלסטיים ניתן לראות בשני מישורים. במישור החומרים החדשים המחליפים חומרים אחרים ואשר זוכים לעתים ליישומים חדשים לחלוטין הודות לתכונות יחודיות של החומר, ובמישור העיבוד שבו תחכום הצידוד מאפשר ייצור מוצרים מרוכבים יותר.

פולימרי גביש נוזלי (liquid crystal polymers) - פולימרי גביש נוזלי (פג"י - LCP) הינם סוג חדש של פולימרים בעלי מולקולות קשיחות בהשוואה לפולימרים קונבנציונליים גמישים. חומרים אלה עוררו ענין רב בעשרים השנה האחרונות הן באקדמיה והן בתעשייה. המבנה הגבישי הנוזלי בא לידי ביטוי באחת משתי צורות: בתמיסה (ליטרופי) או בהתך (תרמוטרופי). ניתן לעבד פג"י תרמוטרופי לסיבים ע"י טוית התך (melt-spinning) קונבנציונלי. הענין בפולימרים אלה נובע בין היתר מכך שהודות לסידור האנאיזוטרופי של המולקולות, חוזקן וצפיפותן מתקרבים לערכים התאורטיים הניתנים לחישוב. המבנה המסועף בפולימרים קונבנציונליים אינו מאפשר להתקרב לערכים אלה [1].

האזורים הקיימים בהתך התרמוטרופי נוטים להסתדר תחת גזירה או מתיחה תוך כדי עיבוד באקסטרוזר או הזרקה. סידור המולקולות בכוונים מוגדרים דומה להשפעתם של סיבים משרינים, ומעלה את חוזק החומר ואת צפיפותו. פולימרים גבישיים כגון PA או POM מגלים התנהגות אנאיזוטרופית מעטה.

הפולימרים הגבישיים הנוזליים הליטרופיים המשמשים לייצור סיבי aramid מבוססים על מולקולה ארומטית בעלת לינאריות גבוהה. הודות ללינאריות ולקשיחות של המולקולה, המבנה המקרומולקולרי הוא בעל דרגה גבוהה של סדר וכתוצאה מכך טמפרטורת ההתכה התאורטית עולה על טמפרטורת הפירוק.

טמפרטורת ההתכה ולאפשר עיבוד בצורת הותך (melt processable) יש להכליל במולקולה הישרה יחידות אשר תפרענה את הלינאריות. ישנם מספר רב של הרכבים תאורטיים אפשריים, אולם העדרם של מונומרים מסחריים מתאימים מונע את פיתוחם של הרכבים אלה. הדרגה שבה נפגמת הלינאריות של המבנה קובעת את נקודת ההתכה של ההרכב הספציפי. תחום טמפרטורות ההתכה עשוי לנוע מ- 250°C ל- 450°C , ולאפשר שימוש בהרכבים שונים עבור יישומים שונים.

מקובל לחלק את הפגיונים לשלוש קבוצות על פי ביצועיהם. הפולימרים בקבוצה I מצטיינים בעמידות תרמית גבוהה. טמפרטורת העיבוד עולה על 400°C ובד"כ גם הלחץ להזרקה הוא גבוה. פולימרים בקבוצה II מעובדים בתחום $280 - 360^{\circ}\text{C}$ והם בעלי צמיגות נמוכה. ניתן לעבדם בצידוד עיבוד קונבנציונלי. לחלק מחומרים טמפרטורת שימוש רציף של מעל 200°C . לפולימרים בקבוצה III תכונות מכניות ותרמיות פחותות, אולם מחירן נמוך מהפגיונים בקבוצות I ו-II.

הפגיון התרמותרופי הראשון שיוצר באופן מסחרי היה Xydar® של Dart & Kraft שהוכנס לשוק בשנת 1984. לחומר נקודת התכה גבוהה, והוא משתייך לקבוצה I. אחד השמושים בו הוא לכלי אוכל תינתנים לחימום הן בתנור קונבנציונלי והן בתנור מיקרו-גל. החומר Vectra של Hoechst-Celanese שהוצג ב-1985 היה הפגיון הראשון ששווק בכל העולם. קו היצור מורכב ממספר פולימרים שכולם מסווגים לקבוצה II. טמפרטורת השימוש הרציף היא מעל 200°C .

אחד התמריצים למחקר בפגיונים תרמותרופיים היה הרצון ליצור חומר הניתן לטויה לסיבים בדומה לפגיון ליוטרופי. התכונות שנדרשו הם חוזק ומודולוס גבוהים של הסיב המוגמר בשילוב יציבות הידרוליטית. הודות למבנה האניאיוטרופי, לחומרים אלה תכונות בכוון האוריינטציה העולות על אלה של פולימרים קונבנציונליים. בכוונים אחרים התכונות משתוות לאלה של פולימרים קונבנציונליים. דרגת החוזק והמודולוס נקבעים ע"י ההרכב הכימי וע"י דרגת האוריינטציה המושגת בשלב העיבוד.

לא ניתן ליצג יציבות מימדית ע"י נתון מספרי בודד. בד"כ תכונה זו משלבת בתוכה שלושה גורמים: (1) כושר ספיגת רטיבות וממיסים. הודות למבנה הדחוס של פגיונים הנטיה של חומרים אלה לספוג היא קטנה מרוב הפולימרים ופחות תלויה בטמפרטורה. (2) מקדם ההתפשטות התרמית; גודל זה הוא נמוך מאוד עבור פגיונים ותורם ליציבות המימדים בסביבה בעלת טמפרטורה משתנה. (3) אי הפיכות שיונים

מימדיים כתוצאה שחרור מעוותי עיבוד או גיבוש. גם תכונה זו היא ייחודית לפג'נים, אשר אינם מתכווצים באופן ניכר בתבניות ואשר נחונם בצמיגויות נמוכות המבטיחות מאמצים נמוכים בעת מילוי חללים.

פולימרים ארומטיים בדרגה גבוהה מקבוצות I ו-II נחונים בעיבוד בעירה עצמי, ואילו הפולימרים הפחות ארומטיים מקבוצה III דורשים תוספת של מעקבי בעירה. לכל הפג'נים חוזק דיאלקטרי גבוה. תכונות אחרות כוללות עבירות (permeability) נמוכה, חיכוך נמוך, עמידות לקרינת γ ושקיפות למעבר גלי מיקרו.

רוב הפג'נים המסחריים כיום משתייכים לקבוצה I ו-II. חלק ניכר מהשוק לחומרים בקבוצה I הוא לכלי אוכל הניתנים לחימום אל מעל ל- 240°C . שימושים אחרים מרוכזים בתעשייה האווירית וביישומים בהם העמידות הכימית של פג'נים באה לידי ביטוי. בנוסף, במגזר האלקטרוניקה נעשה שימוש בפג'נים במכשור העומד בטמפרטורות מעל 250°C בעת הלחמה. שוק אחר הוא מוצרי צריכה אלקטרוניים בהם נדרשת דרגה גבוהה של יציבות מימדית. דוגמא לכך הם מכשירי תקליטורים (compact disc players) שבהם מודולוס גבוה בשילוב המשקל הנמוך של המרכיבים משפר את תגובת התדר (frequency response) של המערכת. שימושים אחרים הם לכוני דיסקטים, דיסקים קשיחים ומרכיבי מכשירי וידאו. בתעשייה הכימית קיימים שימושים רבים בהם ניתן לנצל את עמידותם של פג'נים לחומצות, בסיסים והידרוליזה הנובעת מהמבנה היחודי של הפולימר. פיתוחם של פג'נים הניתנים לציפוי (plateable) יפתח שווקים חדשים כחומר ללוחות למעגלים מעוצבים (molded circuit boards). לפג'נים היכולת להכיל רמה גבוהה של מלאנים. לחלק מחומרים אלה תכונות הדומות לאלה של אלומיניום, והם צפויים להקלט במגזרי הרכב והתעופה. השימושים הצפויים הם בעיקר במערכות הדלק והחשמל. יתרון נוסף של פג'נים הוא תכונת הבידוד האקוסטי שמקורו במבנה הסיבי דמוי העץ [2,3].

במהלך חמש השנים האחרונות פחת מחירם של הפג'נים בכמחצית, ומספר הספקים עלה משניים לתשעה. מספר חברות מיצרות תערובות של פג'נים עם פולימרים אחרים כגון PA או PPS [3]. התחזית היא שהצריכה הכלל עולמית של פג'נים תגיע ל-5,500 טונות ב-1995, עליה המהווה גידול שנתי ממוצע של 25% על פני תקופה של עשר שנים [2].

פולימרים לאופטיקה לא-ליניארית (nonlinear optical polymers) - אופטיקה לא-ליניארית (אלי"ל)
עוסקת בתגובה של חומר דיאלקטרי לשדה אלקטרומגנטי. תגובות אופטיות לא-ליניאריות מקרוסקופיות

ע"י היחס הקונסטיטוטיבי עבור הקיטוב הדיאלקטרי של תווך לא-לינארי בשדה אופטי אינטנסיבי, E. מקורה של ההתנהגות האלינית של חומרים אורגניים אליניים בתגובת הקיטוב של אלקטרונים מולקולריים.

האברים הראשון והשלישי בחזקות אי-זוגיות של E זהים עבור כל החומרים. המקדם χ_1 , הסוסקפטיביליות האלקטרונית הלינארית (סא"ל), מייצג אופטיקה לינארית. χ_3 , הסוסקפטיביליות מסדר שלישי, מייצג תהליכים לא לינאריים מסדר שלישי. דוגמאות כוללות ייצור הרמוניות מסדר שלישי ומיקוד עצמי (self-focusing). התגובה מסדר שני, χ_2 , קיימת רק בתווך בלתי-צנטרוסימטרי, ז"א החסר מרכז סימטריה היפוך טבעי. תהליכים מסדר שני כוללים ייצור הרמוניות ורקטיפיקציה אופטית. נוכחותה של תגובה אופטית לא-לינארית בתווך מובילה למספר גדול של תהליכים ותופעות חשובים מבחינה טכנולוגית בכל תחום התדירויות, וכתוצאה מכך התלות של χ_2 ו- χ_3 בתדר היא תכונה חשובה של תווך לא-לינארי.

פולימרים ולחומרים אורגניים תכונות אלקטרו-אופטיות ואופטיות לא-לינאריות הודות למקור האלקטרוני של קיטוב לא-לינארי, המוביל לפעולת תגובת סרט-רחב (broad-band) מהירה מאוד (פחות מפיקושניה) וקבועים דיאלקטריים dc נמוכים. בניגוד לגבישים אי-אורגניים, ניתן להשתמש בפולימרים לשימושי אל"ל בטמפרטורת החדר. הם נחונים ביציבות כימית ומבנית ואינם מצריכים את אמצעי המיגון או את המערכות הקריוגניות הדרשים לגבישים אי-אורגניים. פולימרים ניתנים לעיבוד לצורות שונות לשימושים שונים: יריעות, סיבים, חומר בצובר (bulk), חומר גבישי, שכבות מונו, פג"נים וכו'. הגמישות של הארכיטקטורה המולקולרית ע"י סינתזה כימית ועיבוד מאפשרת להגיע לתכונות המקרוסקופיות הדרושות. יתרון נוסף של פולימרים (מסוימים) הוא השקיפות הגבוהה, האיכות האופטית הטובה, וסף גבוה לנוק אופטי (מעל 1 gw/cm^2).

ניתן ליתפזר את המבנה המולקולרי הדרוש ע"י הנדסה מולקולרית המבוססת על תאוריות מולקולריות ובנית מודלים בעזרת מחשב. בדרך זו אפשר לקבל דרגה גבוהה של סדר תוך שימוש בפילמור גביש נוזלי בתמיסה. ניתן לשנות את התכונות האופטיות של החומר ע"י שינוי שרשראות הצד הקשורות לשרשרת הפולימר הראשית. ניתן גם לקטב ולכוון את הדיפול המולקולרי ע"י שימוש בשדה חשמלי. ע"י שילוב של פולימר שידרה (backbone) בצרוף הסתעפויות צדדיות של מולקולה אחרת בעל תכונות לא-לינאריות ניתן ליצור חומר אלקטרו-אופטי חדש.

לחומרים חדשים אלה מגוון רחב של שימושים אפשריים. הישומים הפוטנציאליים בתחום האלקטרו-אופטיקה הם רבים: מחשוב אופטי (optical computing), עיבוד אותות אופטי, אמצעי מיתוג וכן סיבים אופטיים. לפולימרים אי-אורגניים יהיה שמוש גם באופטיקת סיבים אינפרא אדומה. סיבים אופטיים פלסטיים (plastic optical fibers, POFs) נוחים יותר לעבודה מאשר אלה העשויים זכוכית, והם עשויים לשמש להעברת אותות אופטיים מרחקים קצרים בקשרי מחשב-מסוף. תהליך לייצור סיבים אופטיים פלסטיים להעברת קרינה בתחום קרוב לאינפרא-אדום (near IR) מבוסס על פנטא-פלואורו סטירן שבו המימינים הארומטיים מוחלפים בפלואור. הפולימר המתקבל מחומם ל-200°C והחתך מוטווה לסיב [4,5].

פולימרים מוליכים (conductive polymers) - התפקיד המסורתי של חומרים פלסטיים הוא כחומר מבודד ולא דוקא כמוליך. פיתוחם של פולימרים בעלי תכונות הולכה עשוי להעניק לחומרים פלסטיים יישומים חדשים, בעיקר בתחום האלקטרוניקה והתעשייה האווירית. פולימרים מוליכים עשויים לבטל את הצורך באנטנות מתכתיות ושאר אמצעים מתכתיים במטוסים, ולהוריד בכך את עלותם של מטוסי קרב ומטוסים אזרחיים מסחריים. השימוש בפולימרים מוליכים מפחית גם את הגרר (drag) הפועל על המטוס כתוצאה מבליטות של חלקי מכשור מתכתי. שמושים נוספים עשויים להיות בהגנת לווניים מפני קרינה מוזיקה ובייצור מצברים. ציפוי יריעות אריזה בשכבה דקה של פולימר מוליך עשוי להעניק תכונות אנטיסטטיות תמידיות למוצר.

מקורו של הכח המצמיד מוצקים הוא באינטראקציות של אלקטרונים. אלקטרונים באטום נמצאים ברמות אנרגיה דיסקרטיות, כשבכל רמה שני אלקטרונים לכל היותר. כששני אטומים או מולקולות מובאים האחד בקרבת השני, קיימת אינטראקציה בין האלקטרונים ושינוי של רמות האנרגיה. כשמספר האטומים או המולקולות העוברות אינטראקציה הוא גדול רמות האנרגיה יוצרות פסי אנרגיה (energy bands). לחומרים מתכתיים אין מרווח (gap) אנרגטי בין רמות האנרגיה הנמוכות המאוכלסות אלקטרונים, ובין הרמות הגבוהות יותר שהן ריקות. למוצקים לא-מתכתיים מבודדים יש לספק אנרגיה רבה על מנת להעביר אלקטרונים מהרמות הנמוכות אל מעבר למרווח האנרגטי לרמה יותר גבוהה. עבור מוצקים מוליכים למחצה המרווח האנרגטי הוא קטן יותר.

תהליך המאפשר לפולימרים מסוימים להפוך מוליכים קרוי סימום (doping). בתהליך זה מסלקים אלקטרונים ולנטיים ומשאירים מטען חיובי במקום. באופן דומה ניתן להוסיף אלקטרונים ולקבל מטען

שלילי. התוצאה בשני המקרים הוא מסלול אלקטרוני מלא חלקית המאפשר הולכה, בדומה למצב במתכות. החסרון של תהליך הסימום הוא בירידה ביציבות הפולימר, ובראקטיביות וברעילות הגבוהים של החומר המשמש לסימום. הפולימרים העיקריים הניתנים לסימום על מנת לחופכם למוליכים הם פוליאצטילן ופוליפירול. חומרים חדשים פותחו בעלי כושר סימום-עצמי (self-doping) המשחררים גרעיני מימן ומשאירים מטען שלילי לאחר הפעלת מתח חיובי נמוך.

לפולימרים מוליכים היכולת להתערבב עם פולימרים בלתי מוליכים דוגמאת נילון, ולשלב בכך תכונות של פולימר הנדסי ופולימר מוליך. לחלק מהתערובות המתקבלות בעיות של הפרדת פאזות. עיני שימוש בשכבות תערובות ביחסים שונים שלהן מוליכות שונה ניתן לקבל חומר עם גרדיאנט מוליכויות לשימושים אלקטרוניים שונים. פולימרים מוליכים פותחים קשת רחבה של אפשרויות לבניית מתקנים מוליכים למחצה או מתגים ברמה מולקולרית. לצרכי התעשייה האווירית יש צורך בחומרים העומדים בטמפרטורות מעל 300°C למשך פרקי זמן ארוכים. מטרה נוספת היא להעלות את המוליכות של חומרים פלסטיים לעבר זו של מתכות כגוגמאת נחושת. עבודה נוספת דרושה גם לגימלון (scale-up) של התהליכים המעבדתיים המשמשים ליצור פולימרים מוליכים לקנה מידה תעשייתי.

סוג אחר של 'פולימרים מוליכים' הם חומרים מרוכבים המכילים מלאן מתכתי. החסרונות של חומרים אלה הם בחולשתם הנובעת מהאדהזיה גרועה בין המתכת לחומר המרוכב, והתחממות כתוצאה של הולכת חשמל במתכת. נעשה ניסיון אחר להקנות מוליכות לחומרים פלסטיים ע"י 'טעינתם' בחלקיקי מתכת או פחמן. החסרונות של שיטה זו הם בעליה במשקל כתוצאה מנוכחות החלקיקים הכבדים, והצורך בתכולה גבוהה של חלקיקים אלה על מנת להבטיח מסלול הולכה רציף, שבו חלקיקים מוליכים נוגעים אלה באלה. שיטה זו היא גם יקרה [6,7].

רשתות פולימר משתלבות (Interpenetrating Polymer Networks - IPNs) - רשתות פולימר משתלבות (רפ"מ) הן תערובות של שניים או יותר רשתות פולימר מצולבות אשר אינן ניתנות להפרדה פיסיקלית. קיימים סוגים כימיים שונים של רפ"מים המיוצרים במגוון שיטות. בתחילה העבודה התרכזה ביצור רפ"מים תרמוסטטיים, אולם לאחרונה החיפוש הוא אחר רפ"מ המתנהג כחומר מצולב אלסטי בטמפרטורת החדר ועם זאת זורם בטמפרטורות גבוהות. במסגרת זו פותחו פולימרים תלת-קבוצתיים (tri-block) כגון SBS שבו לקבוצה האלסטומרית במרכז יש שני קצוות זכוכיתיים. חומרים אלה נתכים וזורמים בחופשיות מעל טמפרטורת המעבר הזכוכיתי של קבוצות הקצה, אולם בטמפרטורת החדר הן דמויות גומי הודות

להצלבות המדומות (pseudo-crosslinks) של הפאזה הזכוכיתית. יונמרים יוצרים אזורים של הצלבה יונת לא-קוולנטית, ובפולימרים גבישיים למחצה נוצרת הצלבה פיסיקלית הודות לאסוסיאציה של האזורים הגבישיים. שילובים של שני פולימרים המוצלבים בדרך זו נקראים רפ"מים תרמופלסטיים [8].

רפ"מים מיוצרים ומשווקים ע"י מספר חברות כמסוכם בטבלה 1.

מערכת הרפ"מ	החברה
Thermoplastic/Thermoset	
Silicone/urethane SEBS/silicone COPE/silicone PO/silicone	Petrarch Systems
Nylon/silicone	LNP
Cyanate ester/PES	Allied
Thermoplastic/Thermoplastic	
SEBC/TP (PP, etc.)	Shell
TPE/LDPE	Dainippon Ink
Thermoset/Thermoset	
Acrylic/polyester	Freeman Chemical

טבלה 1: מערכות רפ"מ מסחריות [9].

בנוסף לחומרים המופיעים בטבלה 1 ישנן השערות כי תערובות מגופרות של EPDM ו-NBR עם פוליפרופילן גבישי כגון Santoprene ו-Geolast של חברת Monsanto וכן סוגים צפידים (Super Tough) של נילון, אצטלים ופוליאסטרס של חברת Du Pont מיוצרים אף הם בטכנולוגיה של רפ"מים [8].

רפ"מ שיוצר לשימוש בטמפרטורות גבוהות (HT) מבוסס על שני סגים של פוליאמיד. הפולימרים במערכת זו הם פוליאמידסולפון ופוליאמידסולפון בעל קבוצה פונקציונלית אצטילית. הפולימר המתקבל הוא קשה לעיבוד, ולמרות היותו תרמופלסטי אין הוא זורם בטמפרטורות מתחת ל-275°C. בעזרת שריון בסיבי

זכוכית מגיעים לחוזק גבוה המתאים לרכיבים בתעשייה האווירית. LNP פתחו לאחרונה רפ"מ משורין סיבי פחמן על בסיס PBT ו-silicone/PTFE המחליף פוליקרבונט משורין. לחומר מקדם חיכוך נמוך מאוד ועמידות גבוהה. צפי שבעתיד תברות נוספות תחלנה לפתח וליצר רפ"מים, אם כי חומרים אלה טרם נקלטו ע"י התעשייה לשימוש בקנה מידה רחב.

פולימרי פלסמה (plasma polymers) - פילמור בפלסמה הינו תהליך היוצר שכבות דקות של פולימר על גבי מצע. זהו תהליך שבו מולקולות המונומר נצמדות אלה לאלה הודות לאנרגיות הפלסמה הכרוכה באלקטרונים, יונים ורדיקלים משופעלים. פילמור בפלסמה שונה מפילמור קונבנציונלי במנגנון רדיקלי או יוני. המונחים 'פילמור רדיקלי' ו'פילמור יוני' מצביעים על הגורם האחראי לגידול שרשראות הפולימר בעת ריאקצית הפילמור. לעומתם המונח 'פילמור בפלסמה' מצביע על מקור האנרגיה לתחילת הפילמור.

ברוב המקרים התוצר של פילמור בפלסמה הינו בעל תכונות כימיות ופיסיקליות יחודיות. הפולימרים המתקבלים הם אמורפיים, קשיחים, צפידים, בלתי מסיסים בממיסים אורגניים ועמידים בטמפרטורות גבוהות. תכונות אלה נובעות מהמבנה הכימי שהוא מסועף ומצולב בדרגה גבוהה. מאחר ומדובר בתהליך בשכבות דקות, חוקרים רבים מחפשים כעת יישומים מעשיים בתחום הציפויים והממברנות. פולימרים בעלי קבוצות הידרוקסי, אמינו או אמידו מגיבים משטחים הידרופוביים. פולימרים על בסיס תרכובות המכילים פלואור או סיליקון נותנים משטחים דוחי מים. לפולימרים אלה אנרגיית שטח נמוכה מאוד בדומה לפוליטטראפלאורואתילן הקונבנציונלי ($1.86 \cdot 10^{-6} \text{ J}$).

התכונות על פני השטח של פולימר שונות מהתכונות בצובר (bulk). הודות למוביליות שלהן, מתכונות מולקולות הפולימר והקבוצות ההידרופוביות וההידרופיליות מסתובבות סביב ציר המולקולה. לפולימרי פלסמה מוביליות נמוכה בגלל דרגת הצילוב הגבוהה של השרשראות; כתוצאה מכך משטחי פולימרים אלה עמידים במיוחד.

אחד היישומים האפשריים לפולימרי פלסמה הנבדקים עתה הוא בממברנות להפרדת גזים. באופן כללי יעילות הממברנה נמדדת ע"י השטף שניתן להעביר דרכה וע"י טיב ההפרדה. רוב המחקר בתקופה האחרונה מתמקד בהפרדת תערובות חנקן-חמצן. פולימרי פלסמה על בסיס תרכובות סיליקון מצטיינים בשטף גבוה אך אינם בעלי כושר הפרדה מספק. על מנת לשפר את הסלקטיביות של הממברנות הוצעו למינטיים על בסיס שני פולימרי פלסמה שונים. יריעות פלסמה יושמו בהצלחה כממברנות לאוסמוזה הפוכה.

פולימרים הידרופיליים הוצעו לשמש זה על מנת לשפר את דחית המלח ולהעלות את השטף. פולימרי פלסמה על בסיס תרכובות המכילים מתכות נחותים בתכונות חשמליות מענינות. פולימרי פלסמה על בסיס בדיל טטראמתילי הם בעלי מוליכות טובה ($10^{-1} - 10^{-2} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$). ניתן להכין פולימרים פוטו-מוליכים (photoconductive) מתרכובות גרמניום שונות, וכן שכבות מוליכות למחצה על בסיס תרכובות אורגנו-מתכתיות או על בסיס קומפלקסים מתכתיים. פולימרי פלסמה על בסיס חומרים המכילים סיליקון וחנקן מציבים פני שטח הידרופיליים, וחשיפה לאדי מתיל ברומיד מגבירה את כושר החרטבה של פני השטח. ניתן לגלות אדי מים עיי מדידת השינויים במוליכות פני השטח, כך שלפולימרים אלה פוטנציאל לשמש במדידות מדויקות. דוגמא נוספת היא פולימר פלסמה על בסיס בדיל טטראמתילי חרגיש לגז פרופן. חשיפה לגז מעלה את מוליכות פני השטח בצורה ניכרת כך שניתן לגלות ריכוזי פרופן בתחום 100 - 5,000 ppm [1].

- (1) N. P. Cheremisinoff, *Emerging Technologies and Applications for Polymers*, JOM, January 1990, pp. 10-16.
- (2) R. A. Signorelli, *Crystal Set*, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, 1989.
- (3) A. J. Klein, *Liquid Crystal Polymers Gain Momentum*, *Plastics Design Forum*, pp. 49 - 56, January/February 1989.
- (4) D. Ulrich, *Nonlinear Optical Polymers*, *Optical Engineering Reports*, pp. 5 - 7, July 1987.
- (5) T. Kaino and Y. Katayama, *Polymers for Optoelectronics*, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29, pp.1209 - 1214, Mid-September 1989.
- (6) T. S. Kuan and R. Cameron, *Using Conducting Plastics*, *Aerospace Composites & Materials*, pp. 31 - 34.
- (7) *Recent Polymer Developments*, *European Plastic News*, pp. 12 - 13, January 1990.
- (8) *High Performance Engineering Thermoplastics*, S. R. Harrison & Associates, May 1988.
- (9) *International Strategic Plastic Reports*.

פרק 7. טכנולוגית עיבוד

תהליכים רבים פותחו לשם עיבוד חומרים תרמופלסטיים, תרמוסטטים וחומרים מרוכבים. בפרק זה נסקור את השיטות העיקריות המשמשות לעיבוד פולימרים ונתייחס ליתרונות ולחסרונות של כל שיטה ולמגמות העתידיות הצפויות.

הזרקת לתבניות (injection molding) - שיטה זו מאפשרת ליצור חלקים מורכבים ביותר בדיוק גבוה. כאשר קו היצור הוא אוטומטי לחלוטין, ניתן להגיע לקצב יצור של מספר אלפי יחידות לשעה. גרגירים (pellets) או אבקות פולימר משמשים כהזנה לתהליך. ההזנה מתרככת תחת לחץ וחום והיא מוזרקת בלחץ גבוה (10,000 - 30,000 psi) לתוך תבנית מתכת באמצעות בוכנה או בורג. הלחץ מוחזק בתבנית עד לחתמצקות ההתך במקרה של חומר תרמופלסטי או עד להשלמת הצילוב במקרה של חומר תרמוסטטי. בגמר העיבוד החלק נורק מהתבנית והוא מוכן לגימור סופי (trimming).

עיצוב קצף מבני (structural foam molding, SFM) מאפשר יצור בהזרקת של חלקים מוקצפים בעלי קרום חלק. המכונות המשמשות לתהליך הן מכונות הזרקת סטנדרדיות בעלות נחיר (nozzle) מיוחד אשר שומרות על הגו תחת לחץ עד לשלב ההזרקת. הכוח המופעל על יחידת הנעילה חייב להיות מספיק גדול על מנת לעמוד גם בלחצים המתפתחים הודות לגו הנמצא במערכת. רוב החומרים התרמופלסטיים מתאימים לעיבוד ב-SFM. חומרי ניפוח (blowing agents) מעורבים עם גרגירי ההזנה, או לחילופין תאון מוזרם לתוך מכונת ההזרקת ומתערבב עם ההתך.

הזרקת של מוצר העשוי שני חומרים שונים נקראת co-injection molding או sandwich molding. בתהליך זה ניתן לקבל מוצר שהמעטפת החיצונית עשויה חומר אחד, ואילו התוכן (שהוא לעתים מוקצף) עשוי חומר אחר. על מנת לקצר את זמן המחזור הכולל, ניתן להזריק את המעטפת בטמפרטורה גבוהה על מנת לקבל גימור חיצוני טוב, ואילו את הליבה להזריק בטמפרטורה נמוכה יותר. ניתן לעבוד עם תבניות בהן החומרים השונים מוזנים מאותו פתח או דרך פתחים שונים. טכניקה נוספת משתמשת בהזרקת של חומר הליבה דרך המעטפת כך שמתקבל אפקט שיש עקב הערבוב. חברת Engel האוסטרית פתחה מכונת הזרקת המזריקה חומרים בארבעה צבעים שונים ליצור חלקים למחשבי כיס.

תהליך חדש הנקרא multi-live feed molding פותח ע"י ה-British Technology Group. בתהליך

זה יש לתבנית מספר נקודות הזנה כשלכל כניסה לחץ אחר. תהליך ההזרקה מבוקר ע"י מיקרו-פרוססור ואמור למנוע היווצרות של קוי הלחמה (weld lines) במוצר וכן למנוע סדקים וחללים פנימיים. מגוון רחב של חומרים תרמופלסטיים ניתנים לעיבוד בדרך זו, עם וללא שריון סיבים. שיטת עיבוד זו מיושמת בהצלחה גם עבור DMCs (dough molding compounds) תרמוסטיים.

הזרקת-דחיסה (compression-injection molding, CIM) מיועדת בעיקר לתרמוסטיים משוריינים, כאשר המטרה היא להפחית את כווניות הסיבים במוצר הסופי. בזמן ההזרקה התבנית מוחזקת במרוח פתיחה של $1/4 - 1/2$ ע"י מעצורים מכניים. לאחר מכן המעצורים מוסרים והתבנית נסגרת לחלוטין. סגירה זו יוצרת זרימה נוספת של החומר, שיש בה בד"כ לגרום להזזה אקראית של הסיבים. טכניקה זו ישימה הן במכונות הזרקה עם בורג נע והן עם מכונות המכילות בוכנה.

תהליך ההזרקה הראקטיבי (reaction injection molding, RIM) ותהליך ההזרקה הראקטיבי של חומר משורין (reinforced RIM, RRIM) נבדלים מ-CIM בכך שהם משתמשים בשרפים נוזליים ראקטיביים במקום בהתך פולימר. מסיבה זו אין ציוד העיבוד כולל אקסטרודר, ובמקומו באה מערכת לאחסון ושנוע השרפים. בד"כ ישנם שני מרכיבים העוברים יחד ראקציה כימית ספנטית. המרכיבים מדודים ומערבבים מיד לפני הזרקתם לתבנית. הערבוב נעשה באחת משתי שיטות: בלחץ נמוך הערבוב נעשה ע"י בורג המסתובב במהירות גבוהה, ובלחץ גבוהה הערבוב נעשה ע"י התנגשותם של הזרמים עצמם. המערכת הכימית היא על פי רוב פוליאוריתן, אם כי צפויה התפתחות משמעותית של RIM של מערכות פוליאוריתן לקראת אמצע העשור הנוכחי. תהליך ה-RIM מבוצע בטמפרטורות נמוכות יחסית ומערכות האחסון והסחרור נשמרו: בטמפרטורה של $60-90^{\circ}\text{C}$. הסחרור הוא רציף ומטרתו לשמור על הומוגניות המרכיבים. מערכות בלחץ גבוה משמשות ליצור חלקי פגוש וחלקים בשידת המכשירים עבור תעשיית הרכב. לאחרונה גילתה תעשיית המיקרו-אלקטרוניקה את הפוטנציאל הגלום ב-RIM והחלה משתמשת בשיטה זו ליצור אנקפסולציה לרכיבים זעירים המשתמשת במנת פוליאוריתן במשקל כ-10 g. הצמיגות הנמוכה של השרף בעת ההזרקה אינה גורמת נזק לרכיבים האלקטרוניים העדינים כפי שהתך צמיג עשוי לעשות. נזק נוסף היה נגרם בעקבות הלחצים הגבוהים והטמפרטורות הגבוהות הכרוכים בהזרקת התך תרמופלסטי. שריון מוצרים מוזרקים ע"י סיבים קצרים ($< 2 \text{ mm}$) מתאפשר ע"י תהליך ה-RRIM המשמש ליצור חלקים חיצוניים לכלי רכב, כדוגמאת ה-Ford Sierra.

תהליך חדש שפותח ביפן מאחד בשלב אחד תרכוב (compounding) והזרקה לתבנית ונקרא

compounding-injection molding. תהליך הזרקה נוסף שפותח ביפן הוא super injection molding (SIM).
המשמש לעיבוד פולימרים הנדסיים תרמופלסטיים מתקדמים דוגמאת פוליאטרסולפון (PES)
ופוליאטראמיד (PEI). תהליך ההזרקה הוא בעל ספטיפיקציות מדויקות ביותר ומילוי התבנית מהיר מאוד.
הכניסה לתבנית היא דרך מעברים צרים מאוד שבמכונה קונבנציונלית היו חוסמים את זרימת החתך.

חיתרונות העיקריים של הזרקה לתבניות הן: היכולת ליצר בקלות יחסית חלקים גדולים בעלי מבנה מורכב, גודל התבנית משתנה בתחום רחב והדיוק במימדי המוצר הוא גבוה, התהליך הוא תחרותי מבחינה כלכלית בתנאי שמסת חיזור היא גדולה, מגוון החומרים הניתנים להזרקה הוא רחב, תהליך העיבוד הוא קצר ויעיל, כמעט ולא נדרש שלב גימור לאחר ההזרקה, והמוצרים מוכנים לשימוש מיידי, וחומר לואי (scrap) ניתן לגריסה לשימוש חוזר.

חסרונותיה של הזרקה לתבניות הן: מאמצים גבוהים במוצר הסופי, לא ניתן לעבד מוצרים דקים מאוד, קשה לעצב מוצרים רב שכבתיים, מחיר גבוה של אב-הטיפוס ושל התבניות הנדרשות לעמידה בלחצים גבוהים (עד 40,000 psi), ונדרשת מסת יצור גבוהה על מנת להיות תהליך כלכלי [1].

הזרקה לתבניות היא תהליך העיבוד הנפוץ ביותר לחומרים פלסטיים. מתוך 6,000 חברות העיבוד במערב גרמניה, 4,000 עוסקות בהזרקה לתבניות. ההערכה היא כי בכל מערב אירופה יש 12,000 מפעלים המיצרים בשיטה זו, ו-10,000 נוספים בארה"ב. בכל העולם יש כ-50,000 מפעלים העוסקים בהזרקה לתבניות [2].

ציוד ההזרקה הקיים כיום בשוק נחון בדיוק גבוה, ונמצא במצב מתמיד של שיפור מדור לדור. נקודות עיקריות אותן מדגישים יצרני הציוד הם אמינות לאורך זמן בצירוף שירותי אחזקה צמודים. דרגת הדיוק של המכונות נמצאת במגמת עליה על מנת לעמוד בדרישות של יצור חלקים טכניים מדויקים. במקרים אלה חשוב לשמור על הומוגניות ההתך (מבחינת טמפרטורה וצמיגות), ולודא פעולה תקינה וחלקה של יחידת הנעילה [3]. מגוון הציוד הקיים כיום בשוק הוא רחב ביותר וכולל יחידות המתאימות לפולימרים תרמופלסטיים, תרמוסטטים, אלסטומרים, סיליקונים נוזליים, קצפים וחומרי עיצוב קרמיים. בין יצרני הציוד יש תחרות גבוהה תוך מאמץ לענות על דרישות הצרכן. בשנים האחרונות פותחו מכונות הזרקה המאפשרות כונון עדין ('fine tuning') לפי צרכים ספציפיים ואשר ניתנות לבניה בקונפיגורציות שונות הודות להרכבם המודולרי. ישנה נטייה חזקה לחסוך באנרגיה, ועקב כך פותחו מערכות הידראוליות המאפשרות גם למכונות

גדולות לעבוד במינימום אנרגיה. מגמה אחרת היא הגברת בטיחות מפעיל המכונה. התפתחויות בתחום האלקטרוניקה עשו רבות לשכלול מערכות הבקרה של מכונות הזרקה ואפשרו יצור מהיר וכלכלי יותר. בנוסף, ניתן כיום לכלול את יחידת ההזרקה במערכת בקרה הכוללת גם מספר יחידות ציוד עזר, עד כדי מערכת בקרה כלל-מפעלית. חלק מהנסיון במערכות בקרה של מכונות הזרקה מיושם גם בציוד אחר כגון אקסטרודרים, מכונות ניפוח ומעצבים בחום. התקדמות נוספת קיימת בתחום הורדת כמות החומר שארי (scrap) למינימום וקימות כבר מכונות העובדות ללא שארית כ-scrapless.

המגמות העתידיות החזויות לעיצוב בהזרקה - אלה תתרכזנה בשלוש הקטגוריות שלהלן:

- (1) שיפור התהליך להגברת איכות המוצר וכלכליות היצור.
- (2) עליה בתהליכי הזרקה רב-מרכיביים.
- (3) עליה משמעותית בדרגת האוטומציה. בתחום האוטומציה אין כללים נוקשים והתוצאה הצפויה היא שיתוף פעולה הדוק בין יצרן הציוד לבין מעבד הפלסטיק אשר יחד יענו על צרכי היצור [2].

צפוי שילוב משמעותי של מערכות מומחה במערכות הבקרה אשר תהינה מסוגלות לבקר את תהליך ההזרקה ולבצע את השינויים הדרושים תוך כדי תהליך היצור. יצרני הציוד דואגים כבר היום שמכונות ההזרקה שהן מיצרות תהיינה מסוגלות להשתלב במערכות עבודה מבוקרות של מפעלי העתיד; דוגמאות לכך הן מכונות של חברות Arburg, Battenfeld, Cincinnati Milacron, Boy ו-Arburg. מכונות הזרקה ענק צפויות להתפתח אשר תהיינה מסוגלות לטפל בחלקי מוצרים גדולים ומורכבים. במקביל, רמת התחכום של המכונות הקטנות תעלה ואלה תועדפנה ליצור חלקים קטנים על פני מכונות גדולות בעלות תבניות בעלות מספר גדול של חללים [4]. ארבע מכונות חדשות לתרמופלסטיים ואחת לתרמוסטטים הוצגו לאחרונה ביריד הפלסטיקה בשיקגו. בנוסף הוצגו מערכות בקרה, רובוטיקה, תזמון החלפת תבניות וציוד עזר. המכונות הציגו שיפורים במערכות הנעילה; דגש הושם על אפשרויות ומהירויות פתיחה שונות ועל קלות הגישה לצרכי שרות. מערכות בקרה חדשות כוללות תוכנות הירצות על מחשב IBM-PC, ותצוגות גרפיות on-line של פרמטרים שונים בתהליך ההזרקה. המגמה הכללית היא לכוון אוטומציה מלאה של התהליך [5].

שיחול (Extrusion) - בתהליך השיחול היתך פולימרי נשאב דרך פיה צורתית לקבלת מוצר בעל שטח חתך קבוע. יש ושלב זה הוא רק נקודת התחלה לעיצוב המוצר. לדוגמא, בשלב נוסף ניתן להעניק הכוונה (אוריינטציה) בכיוון אחד (Nonoriented) או בשני כיוונים (Biaxial oriented) לקבלתמוצרים בעלי

באקסטרודר מודרני ניתן להבחין במספר חלקים:

1. מערכת הזנה (משקלית או נפחית) המזינה חומר בצורת גרגרים או אבקה. בדרך כלל קיימים אמצעים לחימום מוקדם או ייבוש החומר והזנה אוטומטית.

2. מערכת הבורג והצילינדר המתיכה, דוחסת ושואבת את חומר הגלם הפלסטי דרך הפיה.

3. מערכת הפיה הקובעת את הצורה הסופית של המוצר. מימדי המוצר נקבעים מלבד גיאומטרית הפיה על ידי ההתכווצות התרמית של החומר, רמת המשיכה ואפקטים ויסקואלסטיים.

מלבד אקסטרודרים חד-בורגיים, משמשים גם אקסטרודרים דו-בורגיים בדרך כלל לפולימרים הרגישים לדגרדציה תרמית ולתרכוב פולימרים. קיימים מספר סוגים: ברגים משולבים (Intermeshing), סובבים לכיוון אחד (Corotating) וסובבים בכיוונים מנוגדים (Counterrotating).

ע"י שימוש במכונות שיחול ניתן לייצר צינורות, פרופילים בעלי חתך קבוע, לוחות, יריעות, ציפוי חוטים, מוצרים רב-שכבתיים ע"י קואקסטרוזיה, מוצרים מכוונים (חד דו-כיווניים).

מגמות עתידיות בשיחול - דרישות השוק מכתובות תכונות וביצועים מירביים ומחירים נמוכים. בהתאם לכך הפכה הבקרה האוטומטית בתהליך השיחול לסטנדרטית. יצרני המכונות מציעים היום מכונות הדומות באופן מכני לפיכך השוני הוא בתכן הבורג ותכן הפיה.

ההתפתחויות העתידיות באקסטרוזיה הן בעיקרן בבקרה אוטומטית על מירווח הפיה (גששים פיזואלקטריים) לקבלת עובי אחיד ויציבות התהליך, ובברגים בעלי תכן ספציפי בהתאם לשימוש הסופי. ניתן לצפות לפיתוח ברגים בעלי אורך גדול מהרגיל במיוחד לתרכוב וערבוב. מקומות הזנה רבים בצילינדר ובהתאמה תכן מתאים של הבורג (פינים, חריצים וכד').

לקבלת מוצרים רב-שכבתיים יש לצפות להתפתחות במשאבות היתך במגמה להגדיל את יעילות התהליך ולהפריד בין שלב ההתכה ושלב השאיבה.

בשנים האחרונות פותח תהליך לניפוח פילמים המבוסס על בועה כפולה. יש לצפות להמשך פיתוח התהליך בכיוון של הגדלת תפוקה וקבלת תכונות אופטימליות.

פיתוח אקסטרוזרים דו-בורגיים יימשך במיוחד עבור תהליכים ריאקטיביים ותירכוב חומרים פלסטיים.

עיצוב בניפוח (blow molding) - הפעולה הבסיסית של עיצוב בניפוח היא יצירת גליל רציף של פולימר (pre-form) הנקרא גולם (parison) ועיצובו הסופי בשלב שני. ישנם מספר תהליכי עיבוד בקטגוריה רחבה זו:

- ★ ניפוח באקסטרוזיה (extrusion blow molding)
- ★ ניפוח בהזרקה (injection blow molding)
- ★ ניפוח במתיחה (extrusion or injection stretch blow molding)
- ★ ניפוח רב שכבתי של חומרים שונים (co-extrusion/multi-layer blow molding)

אקסטרוזר בודד מסוגל לשרת מספר רב של תבניות. עבור תבניות גדולות במיוחד (8,000 ליטר) משתמשים באוגרי התך (accumulators) בשילוב אקסטרוזר בוכנתי. נפח ההתך הנאגר נע בתחום 1.5-40 ליטר. רבים מתהליכי הניפוח ניתנים לאוטומציה עם תפוקות של כ-5,000 מוצרים בשעה. במכשור מתקדם התפוקה היא פי שלוש מזו. ניתן ליצר בניפוח מוצרים בעלי גימור מעולה, אם כי במוצרים טכניים מסוימים יש צורך בשלב גימור נוסף.

ניפוח בהזרקה פותח בשנות הארבעים והחמישים בארה"ב וקדם לניפוח באקסטרוזיה שפותח בשנות הששים. הקונספציה הבסיסית של עיצוב בניפוח לא השתנתה, אולם במשך השנים שיפורים שונים הביאו לשינויים באיכות המוצרים וגודלם וכן בעליה במספר הפולימרים הניתנים לעיבוד. בחלק מהחומרים יש ליצור נתך או תערובת על מנת להשיג את הצמיגות הדרושה בשלבי העיבוד הראשונים. כתוצאה מכך ניתן למעשה לעצב בניפוח את כל הפולימרים התרמופלסטיים, ובכלל זה אלסטומרים תרמופלסטיים ופולימרים הנדסיים.

ניפוח באקסטרוזיה נפוץ מאוד בעיבוד PVC וחומרים אחרים הרגישים לחום, מאחר והזרימה הרציפה הבלתי מופסקת מפחיתה את הסיכוי לדגדגיה של החומר. בשיטה זו נוח ליצר מיכלים בנפח 4-20 ליטר. יחידת הנעילה מעבירה את הגולם הנוצר לתחנת עבודה אחרת לניפוח. יש לעתים מספר ראשי עבודה המגבירים את קצב היצור. ישנם שני סוגי מערכות ניפוח: באחד הקרוי shuttle תחנות הניפוח ניתנות ונמצאות מצידו ראש האקסטרוזר. במערכת מהסוג השני תבניות הניפוח נמצאות על קרוסלה סובב המגישה כל תבנית בתורה למילוי בגלם. עבודה עם קרוסלה המכילה בין שש ל-48 תחנות נעשית ביצור המוני במסה גדולה כגון בקבוקי קטשופ בארה"ב. תהליך אלטרנטיבי היא אקסטרוזיה לסירוגין (intermittent) המתאימה לפוליאוליפינים ולחומרים לא רגישים לחום. בשיטה זו התך נאגר באקסטרוזר, והניפוח מתבצע מתחת לראש האקסטרוזר. לקבלת מוצר שטוח או בעל צורה מיוחדת יש לעתים צורך למתוח ראשית את הגולם בטרם התבנית נסגרת עליו.

ניפוח בהזרקה הוא תהליך גמיש דו-שלבי המשמש בעיקר ליצור בקבוקים. החומר העיקרי המעובד בדרך זו הוא PET. תהליך זה הוא כמעט ללא חומר שארי (scrapless). בעקרון, ההתך מעוצב בהזרקה לקבלת גולם דמוי מבחנה הכולל תברג סגירה בראשו. בשיטה זו ניתן לקבל משטחים חלקים יותר בעלי פרטים רבים יותר. שיפור התהליך הביא לקבלת מוצרים אחידים לחלוטין ללא שינויים במשקל נפת, ועובי דופן. המגמה הנראית כיום בתעשייה היא מעבר מניפוח באקסטרוזיה של בקבוקים לניפוח בהזרקה. ניפוח בהזרקה משמש גם ליצור אטמים ומפוחים עשויים אלסטומרים תרמופלסטים לתעשיית הרכב.

ניפוח במתיחה מאפשר הכנסת אוריינטציה לחומר המעובד לשיפור חוזק המתיחה, חוזק הנגיפה, הורדת חדירות (permeation) ושיפור בהירות ושקיפות המוצר. החומרים העיקריים המעובדים בדרך זו הם PET, PVC ו-PP. יחסי המתיחה מגיעים ב-PET עד ל-16:1 ול-9:1-6:1 בחומרים האחרים. תהליך יכול להיות חד-שלבי או דו-שלבי. בתהליך החד-שלבי הגולם נוצר ואח"כ מקורר לטמפרטורת האוריינטציה. בתהליך הדו-שלבי ניתן להגיע לפרמטרים אופטימליים ליצור הגלמים ולניפוחם. בדרך זו ניתן לרכוש גלמים מוכנים מחוץ למפעל ולעבדם בחימום מחדש (reheat). ניתן להגיע לקצב יצור של עד 15,000 יחידות לשעה, אולם ההשקעה הראשונית היא גבוהה ומוצדקת רק במקרים של מסת יצור גבוה.

עם פיתוחם של חומרים חדשים בעלי חדירות נמוכה לאדי מים וגזים, ויצורם של יריעות רב שכבתיות בעלות תכונות חסימה (barrier) לצורכי אריזה, נוצר שוק למוצרי ניפוח של חומרים אלה לארזות מזון ומשקאות. שווקים אחרים שנפתחו למוצרים אלה הם מיכלי דלק לרכב ומיכלים לכימיקלים. רוב מיכלי

החסימה כוללים לפחות שלוש שכבות (לדוגמא: HDPE/חוסס/HDPE), אולם לעתים משתמשים בחמש או שש שכבות, במיוחד אם חומר שארי העובר גריסה משמש כאחת השכבות. כתוצאה מכך יש צורך ביותר מאקסטרודר אחד להזנת תבנית הניפוח. החומרים בעלי תכונות החסימה הטובות הן יקרות הרבה יותר מהחומרים התומכים שהם חומרי צריכה. עקב כך שכבת החומר החוסס צריכה להיות הדקה ביותר המסוגלת לעמוד בדרישות מהמוצר הסופי, ועם זאת אחידה בכל מקום. שיטות יצור מתקדמות מאפשרות יצור שכבה אחידה של $20\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$.

רוב התרמופלסטים האמורפיים ניתנים לעיצוב בניפוח בתחום רחב יותר של טמפרטורות מאשר חומרים גבישיים. לאחרונה, עם התרבותם של מספר התרמופלסטים ההנדסיים (כולל נתכים ותערובות), מוצרי ניפוח מיוצרים גם עבור תעשית הרכב, התעשייה האווירית, ענף הבניה ומגזרי האלקטרוניקה והמכונות המשרדיות. הדרישות מהחומר הן לחוזק מספיק על מנת לא להתעוות בשלב הגולם, ואילו גמישות שתאפשר ניפוח לתוך תבנית רבת פרטים. החומרים המשמשים לניפוח באקסטרוזיה הם בדרך כלל בעלי משקל מולקולרי גבוה ופילוג רחב של משקלים מולקולריים. לחומרים אלה צמיגות גבוהה וחוזק התך גבוה. לעומתם, חומרים המשמשים לניפוח בהזרקה, דוגמאת PET או פוליאטילן, הם מהסוג המתאים להזרקה ובעלי משקל מולקולרי נמוך ופילוג משקלים צר יותר. ליצרני חומרי הגלם שיטות שונות לקבלת התכונות הרצויות מהשרפים הפולימריים. שיטות אלה מבוססות על שינויים כימיים או יצירת תערובות. בנוסף לחומרי הצריכה הידועים כחומרי ניפוח מסורתיים, פולימרים אחרים המעוצבים בניפוח כוללים PC, ABS, PC, Mod. PC, PA/PPE, PBT/PC, Mod. PBT, PPO/PPE, PPS, PEI, PES ואחרים.

היתרונות העיקריים של עיצוב בניפוח הן: גמישות התהליך, מחיר נמוך של פיות לניפוח באקסטרוזיה, קצב יצור גבוה, האפשרות ליצור צורות חלולות מורכבות, כמויות נמוכות של חומר שארי (scrap) הניתנות לגריסה ועיבוד מחדש, אפשרות לאוריינטציה דו-צירית (biaxial) המשפרת תכונות חסימה וחוזק, וניתן לסמן מוצרים תוך כדי העיבוד.

חסרונותיו של עיצוב בניפוח הן: התהליך מוגבל למוצרים חלולים, קשה לעתים לשלוט במדויק בעובי הדופן, ציד ניפוח בהזרקה הוא יקר, דרושה השקעה ראשונית גבוהה לציד ניפוח במתיחה [1,6].

המגמות העתידיות החזויות לעיצוב בניפוח - השימוש במיקרו-אלקטרוניקה לבקרת תהליכי הניפוח

השונים מתבטא כעת ביצור כלכלי ובאיכות גבוהה של מוצרים טכניים ומיכלים לאריזה. המגמה היא מעבר ממכונות בעלות שימוש יחיד למכונות גמישות יותר הפועלות במידה רבה יותר של אוטומציה. מגמה זו חזקה במיוחד ביצור מוצרים טכניים שונים כגון מיכלי דלק לתעשיית הרכב. המעבר הגובר לעבודה במערכות יצור באינטגרציה-מחשב (computer-integrated manufacturing, CIM) מקלה על היצרנים לעמוד בדרישות ההולכות ומחמירות מצד הלקוחות. אם בעבר לקוחות הסתפקו בבקבוק שלא נוזל, כיום הדרישות הם גבוהות הרבה יותר. מערכות אלה חוסכות איסוף ידני של נתוני איכות היצור ועיבודם הסטטיסטי (SPC). בעבר עבודה זו גולה כמחצית מזמנו של המפעיל, ושינוי פרמטרים נעשה לכ היותר אחת לשעה. מערכות ממוחשבות מאפשרות מעקב רציף על האיכות ושינוי פרמטרים בהתאם. מערכות CIM הן יקרות ועלותן יכולה להגיע לכמיליון דולר ויותר. הן מאפשרות כונון עדין ביותר ועקב כך חסכון בחומר גלם, הבא לידי ביטוי בעיקר במסת יצור גדולה. יתרון נוסף של מערכות אלקטרוניות מתקדמות הוא בשרות ואחזקה שלהן. בעבר היה צורך בידע רב על מנת לתחזק ולטפל בתקלות. כיום תקלה מצוינת ע"י נורה הנדלקת בשידת המפעיל, המורה לו להחליף מודול זה או אחר. מערכות CIM אחדות מרכזות נתוני יצור ותהליך במסוף מרכזי וומציגות פחות נתונים בתחנת המפעיל. אחת ההערכות היא שמערכות CIM מורידות את כמות החומר השארי (scrap) בכ-5% ומעלות את תפוקת היצור באותה מידה. יצרן אחר טוען שלעומת מצב בעבר בו לא ניתן היה להגיע ליצור ב-80% מהקיבולת (capacity), לאחר התקנת מערכת CIM המפעל מיצר ב-90% מהקיבולת. שיפור איכות המוצרים הביאה גם לחוזים ארוכי טווח בין יצרנים ללקוחות. דיוק המערכות הוא גבוה; לדוגמא סטיה של $\pm 2.5^{\circ}\text{F}$ מהטמפרטורה ב-setpoint וסטיה של ± 0.04 שניות בזמן מחזור של 7 שניות [6,7].

עיצוב בחום (thermoforming) - תהליך העיצוב בחום, או בשמו האחר - עיצוב בואקום, מבוסס על חימום יריעה או משטח של חומר פלסטי ועיצובם באחת ממספר טכניקות. ניתן להשתמש בלוחות סופיים של חומר או ברצף ארוך. שיטת עיבוד זו התפתחה בשנות החמישים ושמשה בתחילה ליצור מוצרים קטנים. עד מהרה שמש התהליך לעיצוב מוצרים גדולים יותר כגון דפנות מקררים, אמבטיות ומוזודות עשויות מפוליסטירן ו-ABS. בשנות הששים חומרים נוספים דוגמאת פוליפרופילן ו-HDPE עובדו בטכניקה זו. ב-1984 החל עיצוב בחום של חומר רב-שכבתי (co-extruded film).

העיצוב התרמי של לוחות סופיים יכול להעשות במספר דרכים. הדרך הפשוטה ביותר היא יניקת הלוח בעזרת ואקום לתוך תבנית נקבית (straight vacuum forming). האזורים האחרונים הנצמדים לתבנית הם הדקים יותר. ניתן לשלב את היניקה בעזרת ואקום עם לחץ אויר חיובי מצדו השני של הלוח.

שיטה נוספת היא חימום הלוח והצמדתה לתבליט (תבנית זכרית) ומשיכת ואקום דרך התבליט המצמידה את הלוח. שיטה זו נקראת drape forming. דרך המשלבת תבנית ותבליט היא matched die forming בה שני החצאים נצמדים על הלוח המחומם. התבנית מצוידת בחורים מתאימים לשחרור אויר נכלא. עיצוב בדרך זו מאפשר קבלת פרטים בדיוק גבוה. ב-plug assist forming נעזרים בלחץ אויר מכוון התבנית הנקבית על מנת ליצור בועה מתחת ללוח המחומם המותחת את החומר באופן אחיד. בשלב השני לחץ אויר נגדי, או לחילופין תבליט, מצמידים את הלוח אל התבנית. יתרון השיטה הוא בעובי הדופן האחיד של המוצר המתקבל. דרך עיצוב נוספת היא vacuum snap-back בה מופעל ואקום בכוון הפוך לתבליט המותח את לוח הפולימר. בשלב השני הואקום מוחלף בלחץ אטמוספרי והתבליט נדחף אל הלוח ומעצב אותה. דרך זו מיושמת ביצור מזוודות וחלקי רכב.

ישנן גם מספר שיטות לעיבוד לוח רציף. השיטה הפשוטה כוללת תחנת חימום אחת ותחנת עיצוב אחת, כשהלוח משונע ע"י מערכת מבוקרת מחשב. ניתן לעבוד גם במערכת עם מספר תחנות מכל סוג. ההזנה היא מגליל או ישירות מקלנדר. דרגה גבוהה של אוטומציה מצויה ביחוד ביצור אריזות. תהליכי משנה אוטומטיים כוללים מחזור חומר שארי, חיתוכים, חירורים והדפסות על המוצר. ניתן לעבד גם לוחות רב-שכבתיים שאחד המרכיבים נחון בתכונות חסימה (barrier). קצב היצור של מוצרים מלוחות רציפים מגיע עד מספר עשרות לדקה.

החומרים העיקריים המעובדים בעיצוב תרמי הם ABS, פוליאסטר, פוליפרופילן, PVC ופוליסטירן. בנוסף מיצרים בטכניקה זו מוצרים עשויים מפוליקרבונט, אקריליים, ויונומרים. רשימת החומרים המעובדים בעיצוב תרמי הולכת וגדלה, ולמעשה מבחינה טכנית אין אף פולימר תרמופלסטי שלא ניתן לאקסטרוזיה ולעיצוב בחום. בעבר חומרים גבישיים וגבישיים-למחצה הוו בעיה למעבדים עקב נטיתם לקבל עוותים תחת חום (sag). אולם שליטה במשקל המולקולרי ו/או בצמיגות (לעתים ע"י תוספים) פתרה בעיות אלה. גודל הלוחות המעובדים ממשיך לעלות עד כדי 2×3.5 מטר בעובי מעל 1 cm. עומק התבנית עבור לוח כזה עשוי להגיע למטר. בעיבוד לוח רציף ניתן להגיע לרוחב של עד מטר וחצי.

היתרונות של עיצוב בחום הן: מחירו של אב טיפוס המיצר בעזרת תבניות זולות הוא נמוך, הדיוק ביצור הוא טוב, ניתן ליצר חלקים דקים יותר מאשר בכל שיטת עיבוד אחרת, התהליך הוא כלכלי גם בסדרות יצור קטנות, ניתן להגיע ליצור של 10,000 יחידות לשעה (באריזה), והשקעת ההון הראשונית היא נמוכה בהתייחס לשיטות עיבוד אחרות.

החסרונות של עיצוב בחום הן: ניתן לקבל פרטים רק מצדו האחד של המוצר, הצורות הניתנות לעיצוב הן מוגבלות, דרוש כח עבודה רב יותר מאשר בשיטות עיבוד אחרות, עקב הצורך בפעולות גימור משניות, מחירו של לוח המשמש הזנה לתהליך הוא פי אחד וחצי משרף היסוד עבור חומרי צריכה ופי חמש עבור פולימרים יחודיים, ורמת החומר השארי הוא גבוה [1].

המגמות העתידיות החזויות לעיצוב תרמי - השיפורים העיקריים הנראים עתה בציוד עיצוב תרמי הם מערכות שינוע בעלות דיוק גבוה ומהירות גבוהה, היכולת לעבד לוחות רחבים יותר, יחידות נעילה בעלות כח סגירה רב יותר, מערכות בקרה מתוחכמות יותר המיטיבות לבקר את טמפרטורת העיבוד והמיעלות את סדר הפעולות הכרוכות בתהליך העיצוב בחום, וכן המתעדות את היצור. בנוסף, זמן החלפת מערכת התבנית צומצם (quick mold change, QMC) ומתבטא ביעילות גבוהה יותר של יצור סדרות קצרות בעיקר. שופר גם ציוד העזר המשרת את תהליך העיצוב התרמי. ציוד זה כולל יחידות חיתוך (trimming) והעמסה אנכית לשם אחסון (stacking) [8].

עיצוב של לוחות תרמופלסטיים משוריני זכוכית (GMT forming - hot stamping) - לוחות תרמופלסטיים משוריני זכוכית הינם לוחות של פולימרים תרמופלסטיים בשילוב סיבי זכוכית ארוכים או קצרים (פחות מ-2.5 cm) ומלאנים אחרים. הלוחות עצמם מיוצרים במגוון שיטות. בתהליך הלמינציה (lamination) מחברים מספר יריעות פולימר עם רשתות סיבים. לחילופין מכסים רשת סיבים באבקת פולימר, סיבים קצוצים, מלאנים ומעבירים את החומר דרך מערכת גלילים מחוממים. תהליך אלטרנטיבי בשם תהליך Radlite הוא מודיפיקציה של תהליך יצור נייר שבו מחליפים את סיבי העץ ואת שאר המרכיבים באבקת שרף וסיבי זכוכית קצוצים. ראשית יוצרים קצף מימי הומוגני ואח"כ ממוטטים אותו ע"י ניקת המים מתוכו. התוצאה היא מעין 'מחצלת' (mat) רטובה. את המחצלת מיבשים ואח"כ כובשים בחום לקבלת לוח.

עיצוב הלוחות נעשה באחת משתי שיטות עיקריות: עיצוב במצב מוצק (solid-state forming) ועיצוב בזרימה (flow molding). עיצוב במצב מוצק מיושם רק על מטריצות תרמופלסטיות של פולימרים גבישיים למחצה, מאחר ופולימרים אמורפיים קשיחים (stiff) מדי מתחת ל- T_g . עיבוד פולימרים גבישיים למחצה נעשה בין T_g לבין טמפרטורת ההתכה. מורכבות המוצר הסופי מוגבל ע"י יחס המתיחה האפשרי בפולימר. עבור פוליפרופילן יחס זה הוא 10:1, ואילו עבור PET ונילון היחס הוא 5:1. עבור צורות פשוטות

יחסית העיבוד נעשה כ-10°C-5 מעל לנקודת ההתרככות של המטריצה. הלוח מונח בין שני חצאי תבנית הנסגרים למשך כ-15 שניות. חומר שארי נגרס ומשמש בהזרקה לתבניות.

עיצוב בזרימה אינו מוגבל לפולימרים גבישיים למחצה מאחר והמטריצה מותכת לפני העיצוב. עם זאת טמפרטורת העבודה נמוכה בד"כ מזו עבור אקסטרוזיה או הזרקה לתבניות. המוצרים המתקבלים נדרשים לגימור בחיתוך (trimming) מכיון שהחומר המרוכב נדחס לתוך התבנית. באופן זה ניתן ליצר חלקים מורכבים יותר מאשר בעיצוב במצב מוצק. זמן העיצוב הוא ארוך יותר ומגיע לכדקה. המשטח החיצוני של המוצרים הסופיים נחון במראה סיבי. סיבים עשויים להפרד מההתך, ומגבילים בכך את מורכבות החלק המיוצר. באוטומציה של התהליך משתמשים במחסנית המכילה לוחות חלקים המזונים לתהליך ומחוממים למשך כשתי דקות על סרט נע בתוך תנור אינפרא-אדום לפני שלב העיצוב.

בד"כ הגבולות החיצוניים של המוצר נוצרים ע"י דפנות התבנית בעת סגירתה, אולם לעתים גבולות אלה אינם חלקים יש צורך בתהליכי עיבוד משניים או תהליכי גימור לאחר העיצוב העיקרי. תהליכי עיבוד משניים כוללים גם חיתוכים שונים ופתיחת פתחים במוצר. ניתן גם לשלב במוצר חלקי מתכת כגון ברגים תוך כדי העיצוב.

מגוון רחב של חומרים תרמופלסטים מצוי בצורת לוחות משוריינים. גודל הלוחות מגיע עד 8 x 4 ft, והעובי נע בתחום 1/16-3/8". הלוחות המסחריים שניתן להשיג כיום כוללים לוחות פוליפרופילן של Ahlstrom, פוליפרופילן של Exxon, פוליפרופילן, נילון ו-PET של AKZO, פוליפרופילן ו-PET של Azdel Inc., פוליפרופילן, HDPE ונילונים של BASF-Elastogran, פוליקרבונט, נילונים ו-PPS של Bayer AG, PP/PA, ו-TPU של Chemie-Linz AG, נילון 66 ו-PET של Du Pont, PET, נילון של Isosport, פוליקרבונט ו-PPO של General Electric, פוליפרופילן, PBT ונילונים של Menzolit GmbH, PPS של Philips Petroleum, פוליפרופילן ונילון של Snia Spa, פוליפרופילן של Symalit AG ונילון 6, נילון 66, PET, PBT, ופוליפרופילן של Vitrofil/Montedipe/Technopolimeri.

חיתרונות של עיצוב GMT הן: החומר קל ב-30% מאשר SMC, אין צורך באיחסון בטמפרטורה נמוכה (בניגוד ל-SMC), ניתן לחתוך לוחות חלקים לגודל המתאים ולאחסנם, כמויות קטנות של חומר שארי הניתן לגריסה ומחזור, המוצר ניתן לצביעה ללא טיפול מוקדם, חוזק גבוה של המוצר, ואפשרות למורכבות גבוהה של המוצר.

חסרונות של עיצוב GMT הן: מחיר גבוה של לוחות הגלם, מחיר האחזקה של מרכיבי התהליך הוא גבוה, יש צורך לקצר את משך תהליך העיבוד, שיטות חיבור וחלחמת חלקים זקוקים לבחינה מדוקדקת ואפיון [1].

המגמות העתידיות החזויות לעיצוב GMT - כושר עיצוב ה-GMT של המעבדים באירופה עומד כיום על כ-30,000 - 25 טונות לשנה, כשמחצית מכושר היצור מצוי בידי חברת Arjomari הצרפתית שהיא כיום חלק מ-Exxon. נתון זה צפוי לעלות לכ-75,000 תוך 15 שנים. GMT בתעשיית הרכב באירופה עלה ב-80% מערכו בשנת 1985 ל-3,600 טונות ב-1986. עיצוב GMT חוזי להתפתח בתעשיית הרכב וכן ליצור מארזים למכוונות משרדיות ולמכשירי חשמל ביתיים.

עיצוב תרכובי יריעה (sheet molding compound (SMC) molding) - זהו תהליך פשוט הדומה לעיצוב בכבישה המשמש לעיבוד אבקות תרמוסטיות דוגמאת פנול-פורמאלדהיד, מלמין-פורמאלדהיד ואוריאה-פורמאלדהיד. במקורם ה-SMCs היו מבוססים על שרפי פוליאסטר בלבד, אולם כיום ניתן להשיג תרכובי יריעה מבוססים על אפוקסי, פנול-פורמאלדהיד ופוליאוריתן. SMCs מיוצרים בתהליך רציף על סרט נע המוזן בשרף וסיבים קצוצים. השכבה המתקבלת בעובי $1/8$ - $1/4$ נכרכת בין שכבות מגנות של יריעות פוליאאתילן. גלילים של החומר עוברים הבשלה (mature) למשך כ-24 שעות על מנת להשיג את הצמיגות הרצויה. אורך חיי המדף של התרכוב הוא כשלושים יום, או יותר בתנאי קרור. תכולת הזכוכית בירעות היא כ-25-40% ואורך הסיבים כ-2.5-5 cm.

בזמן כבישת החומר, הן השרף והן הסיבים יזרמים לתוך פרטי התבנית. תהליך העיצוב משמש בד"כ ליצור בסדרות גדולות של מוצרים קטנים ובינוניים (עד 2 m^2). לחץ הכבישה נע בתחום 500-2,000 psi והטמפרורה היא בתחום 140 - 160°C . קצב יצור אופייני הוא כ-20-80 יחידות לשעה. תהליכי ציפוי בתוך התבנית (in-mold coating, IMC) באים לשפר את תכונות המעטפת של המוצר. בתהליכים אלה ציפוי תרמוסטי מוזרק לתוך התבנית על גבי ה-SMC. לעתים תוספים שונים כגון שרפים תרמופלסטיים מוספים לתרכוב על מנת לשפר את איכות המשטח החיצוני, למשל עבור חלקי גוף בתעשיית הרכב. נראה כי תהליכי IMC יהיו הפתרון שיבחר ע"י חברות רבות כאשר המגמה תהיה בהורדת זמן המחזור.

יתרונות של עיצוב SMC הן קצב יצור גבוה (זמן מחזור של 1-4 דקות), איכות גבוהה של המוצר, יציבות מימדית של המוצר, מקדם התפשטות נמוך, עמידה בפני שריטות, מחיר נמוך בהשוואה לפולימרים הנדסיים יחודיים, עמידות בקורוזיה, וחוזק גיפה גבוה.

החסרונות של עיצוב SMC הן: מחיר ציוד גבוה, קשיים במחזור SMC, צורך בשלבי גימור או תהליך IMC, ואורך חיי מודף קצרים ללא קרור [1].

עיצוב שרפים בהעברה (resin transfer molding, RTM) - תהליך מתחרה לעיצוב SMC הוא RTM שנחשב פעם לתהליך עיצוב נוזלי שחתאים למגזרי שוק צרים בלבד. לאחרונה, טכנולוגיה זו משמשת יותר ויותר ביצור חלקים גדולים מחומרים מרוכבים. RTM הוא פיתוח של עיצוב בכבישה שבו מאגר של תרכובת עיצוב (molding compound) ממוקם בכניסה לתבנית. עם סגירת התבנית החומר נדחף דרך מעברים צרים אל החללים של התבנית.

הכח הדוחף לפתוח התהליך נובע משני מקורות. האחד הוא המגבלות המוכתבות עתה בחוק באשר לשעור פליטת הסטירן בזמן העיבוד. המגבלות מתיחסות הן לאוירה בתוך המפעל והן לפליטה לסביבה. היתרון של RTM הוא שהתהליך (בניגוד לדרכי עיבוד אחרים) נעשה בתוך תבנית סגורה המפחיתה את הפליטה. המקור השני לעליה בפעילות ה-RTM הם המוצרים בעלי ערך מוסף גבוה הדורשים חוזק מבני גבוה ומראה אסתטי. תעשיית הרכב היא אחד המניעים העיקריים להגברת השימוש ב-RTM, ויש בה מגמה של מעבר לחומרים מרוכבים תרמופלסטיים ותרמוסטטים.

עד לאחרונה עיצוב SMC הווה כמעט אופציה בודדת ליצור משטחים גדולים בעלי גימור טוב, בהדירות ובמהירות. RTM הוא כעת מתחרה רציני ליצור חלקים אלה. יתרון נוסף שיש ל-RTM על פני SMC היא האפשרות לכלול ליבה מוקצפת או משורינת וליצר בשלב אחד מבנה מורכב וחזק. זמני המחזור של RTM הם כ-15-20 דקות, הרבה יותר מזמני המחזור של עיצוב SMC המצטמצמים לעתים לדקה. יתרון גדול ל-RTM הוא מחיר הציוד הול יחסית לציוד SMC. יתרון השיטה על פני שיטות המשתמשות בתבנית פתוחה כגון hand lay up או התזה (spray-up) הוא במהירות העיבוד, בירידה בסיכוי לזיהום השרף ובדרישה הפחותה למיומנות העובד.

RTM משמש לעיבוד אוריתנים, פוליאסטר, אסטרים וינילים, אקרילטים, אפוקסי ופנוליים. התהליך

משמש ליצור חלקים לרכב כגון מכסי מנוע ופגושים למשאיות White, Volvo ו-GMC. בנוסף, ישנן מכוניות כגון ה-Lotus Elan וה-Alpha Romeo SZ שכל גופן מיוצר ב-RTM. מכוניות אלה מיוצרות בסדרות קטנות וזמן המחזור הארוך של RTM אינו מהווה בעיה. מקורות המקורבים ל-Elan מוסרים כי הייצור לא היה אפשרי ב-SMC. שימוש עיקרי ל-RTM בארה"ב הוא לגנות נפתחים למכונית ה-Chevrolet Corvette. שטח הגג הוא 12 ft^2 וכ-4,000 יחידות מיוצרים בשנה. שימושים אחרים הם בתעשייה האווירית.

המגמות העתידיות החזויות ל-RTM - המגמה עכשיו אצל יצרני ציוד ה-RTM היא לקצבי שאיבה גבוהים יותר על מנת ליצר חלקים גדולים יותר. תפוקת השאיבה המקובלת היא כ-25-30 ק"ג לדקה. שיפורים הנדסיים כוללים אמצעים לשמירת צמיגות קבועה ולמניעת תנודות בלחץ. למרות השיפורים הטכנולוגיים, עיצוב ב-RTM צפוי להיות מוגבל לפחות מ-25,000 יחידות לשנה בעתיד הנראה לעין.

עיצוב ע"י hand lay up - תהליך זה מתאים מבחינה כלכלית ליצור כמויות קטנות של גופים גדולים עשויים פולימר משורין. השיטה כרוכה בעבודת כפיים רבה. שלבי התהליך הם: (1) ניקוי התבנית ומריחת שכבת חומר סיכה להקל על שחרור המוצר מהתבנית; (2) מריחת שכבת שרף טהור על פני התבנית בלוי חומרי Curing. פעולה זו מבטיחה שהמעטפת של המוצר יהיה פולימר נקי; (3) הערמת שכבות של שרף עם שריון (בד, סיבים או ימחצתי) עד לקבלת המוצר הסופי; (4) מריחת שכבה נוספת של שרף טהור לאיטום; (5) שחרור מהתבנית ופעולות גימור ידניות.

שרף הפוליאסטר מתקשה בטמפרטורת החדר ללא צורך בחימום. בנוסף, תהליך ה-curing אינו כרוך בשחרור נדיפים כך שלא נוצר לחץ בתבנית וניתן ליצר גופים גדולים בתבניות הפתוחות לאטמוספירה. התבניות ניתנות לבניה מחומרים זולים דוגמאת עץ או חומרים פלסטיים, אם כי במקרה זה מספר מחזורי השימוש בהם קטן יותר. תהליך שחרור המוצר מהתבנית עשוי להיות ארוך. אזורים דקים במוצר עלולים להיות נטולי שריון ולהכיל שרף בלבד. תהליך העיצוב דורש מיומנות גבוהה של המבצע ומשמש ליצור גופי סירות פנלים לבניה וואבות טיפוס [10].

עיצוב בחתזה (spray-up) - בשיטת עיבוד זו סיבי זכוכית קצוצים נורקים שכבות-שכבות על התבנית באופן אקראי בלוי מתז של שרף. השכבות הנוצרות הן תפוחות מעט ויש לישרן ולהדקן בעזרת גלילים המוציאים את האויר הכלוא ומונעים היוצרות חללים. חוזרים על הפעולה מספר פעמים כשניתן להשתמש בשכבות השונות בהרכבים שונים של שרף ו/או סיב. השיטה משמשת בעיקר לעיצוב פוליאסטר,

פוליאוריתן ואפוקסידים. לעתים התבנית מחוממת. עלות העיבוד בהתחלה דומה לזו שב-hand lay-up אלא שמכיון שהתוצר החומר מביא למוצר שצורתו דומה יותר לתבנית עבודת הגימור הן פחותות. גם כאן יש דרישה למיומנות גבוהה של העובד. בניגוד לפעולה הידנית תהליך זה ניתן לאוטומציה.

שק ואקום (vacuum bag) - בשתי השיטות האחרונות (lay-up & spray-up) תהליך ה-curing
נעשה ללא הפעלת לחץ חיצוני. עבור מוצרים רבים תהליכים אלה מספקים, אם כי לא מושגים דחיסה וחוזק מקסימליים; במוצר נשארים חללים, סיבים אינם מגיעים לכל הפינות ומתקבלים אזורים עשירים בשרף ללא שריון. מתברר שגם הפעלת לחץ בינוני מספיק על פי רוב לפתור בעיות אלה במידה מספקת. דרך אחת להפעלת לחץ היא ע"י עטיפת המוצר בשק וניקת האויר מתוכו ע"י מערכת ואקום. הלחץ האטמוספרי שמחוץ לשק מצמיד את השק באופן אחיד אל המוצר. בנוסף ליצירת הפרש לחצים בתחום 10 - 14 psi, ניקת האויר נוטה גם לשחרר את בועות האויר במוצר הרטוב ולהקטין את הפרוזביות. את השק עושים מניאופרן, גומי טבעי, PVC, פוליוניל אלכוהול או מיריעה גמישה של חומר אחר. ניתן להאיץ את ה-curing ע"י חום. במידה ויש צורך בלחץ גבוה יותר, ניתן להשתמש בשק נוסף העוטף את כל המערכת. לתוך שק זה, הנקרא שק לחץ, מזרימים אויר דחוס המגביר את הלחץ על שק הואקום הפנימי.

מיכלי לחץ (autoclaves) - ניתן להגביר את הלחץ החיצוני במידה משמעותית ע"י הנחת מערכת שק
הואקום בתוך מיכל לחץ המסוגל לבנות לחצים בתחום 100 - 200 psi. לחץ גבוה עוד יותר (עד 1,000 psi) מושג ע"י שמוש ב-hydroclave. יש לדא שהשק הפנימי אטום היטב על מנת למנוע חדירת אויר דחוס, קיטור או מים אל תוך החלק המעוצב. בלחצים גבוהים ניתן לותר על הפעלת ואקום בתוך השק הפנימי.

פולטרוזיה (pultrusion) - זהו תהליך נוסף לעיבוד פולימר המשווין סיבים ארוכים ואשר נותן מוצר
בעל אוריינטציה גבוהה. סיב רציף נפרס מגליל ומועבר באמבט המכיל שרף. הפתיל נמשך דרך גליל מחומם שבסופו פיה הדומה לזו של אקסטרוזר. שיטה זו משמשת ליצור פרופילים רציפים כגון תעלות, זויות, מוטות ויריעות. השרפים שמשמשים בשיטה זו הם בדי"כ פוליאסטר, אפוקסידים ואוריתנים.

המגמות העתידיות החזויות לפולטרוזיה - התפתחות ציוד הפולטרוזיה תוך שיפור הדיוק ומערכות
הבקרה וכן שיפורים בשרפים ובסיבים המיועדים לעיבוד בשיטה זו הגדילו את הפוטנציאל של פולטרוזיה לחדור לשווקים חדשים. למרות שרוב המעבדים עדיין משתמשים בפוליאסטר וסיבי זכוכית, מספר הולך וגדל של מוצרי פולטרוזיה מכילים שרפים אחרים וסיבי פחמן. שילוב המכונות והחומרים החדשים

מאפשרים עתה ליצר פרופילים גדולים הרבה יותר בעלי תכונות משובחות במחיר בר תחרות. רוב יצרני הציוד מספקים מכונות המסוגלות למשוך פרופילים עד רוחב 600 mm, ויש גם מכונות המיצרות פרופילים ברוחב 1,000 mm. ההערכה היא שבשנת 1988 50,000 טונות חומר מרוכב עובדו בפולטרוזיה, והתחזית היא לעליה עד 90,000 טונות בעתיד הקרוב. המוצרים העיקריים המתפתחים בפולטרוזיה הם קורות (beams) המיועדים לבניה, יארגזים למשאיות, קפיצים לרכב, חלקי מטוסים, קרונות רכבת וחלקי גשרים; זאת בנוסף למוצרים קונבנציונליים קטנים יותר כגון סולמות, מסגרות לחלונות, גפיים מלאכותיות ומעקים. לאחרונה מתפתחת מגמה של עיבוד חומרים תרמופלסטיים בפולטרוזיה; מדובר בעיקר בפולימרים הנדסיים כגון PPS, PES ו-PEEK שיש ביכולתם לשפר בצורה משמעותית את תכונות המוצר המעובד [11,12].

ליפוף סיבים (filament winding) - שיטה זו דומה לפולטרוזיה, אלא שבמקום למשוך את החומר דרך גליל מחומם ולעצב אותו ע"י פיה, פתיל (או סרט) מלופף על גוף מסתובב (mandrel) המשמש תבנית זכרית. צורת הגוף קובעת את הצורה הפנימית של המוצר החלול המתקבל וזוהי הליפוף קובעת את האוריינטציה במוצר הסופי. ניתן באותו מוצר לשלב ליפוף בזוויות שונות ובכוונים שונים (עם כוון השעון ונגדו). לעתים לא ניתן לשחרר את התבנית מתוך המוצר שנכרך סביבה ויש צורך בתבנית מתפרקת. עיצוב ע"י ליפוף סיבים משמש בעיקר לפוליאסטר, אפוקסי ופוליאסטר-PET. התהליך משמש ליצור מוצרים הדורשים חוזק היקפי כגון מיכלים וצנרת. הצבא הבריטי משתמש עתה באחלים לתנאי קור (-30°C) המצוידים במוטות גמישים שמיוצרים בליפוף [10,11].

תרכוב (compounding) - ככל שהולך וקטן מספר הפולימרים החדשים המפותחים במעבדות המחקר של יצרני הפלסטיק הגדולים, כך עולה הדרישה לשינוי תכונות של פולימרים מסחריים ע"י תהליך תרכוב. ענף התרכוב נמצא כעת בתנופת צמיחה, ועברו הימים בהם פרושו של תרכוב היה פשוט הוספת תוספים שונים לשרף בסיס וערבוב באקסטרוזר או מערבול Banbury. אמנם, רבים הם המוצרים המצליחים המיוצרים בדרך זו, אך הצטברות נסיון מעמיק ותחכום נותן עתה לחברות התרכוב את היכולת לעמוד במגוון רחב של דרישות בתחום תכונות החומר, מראהו, צבעו ויחסי ביצועים/עלות. לעליה בענף התרכוב תרמו שני גורמים עיקריים. האחד היא העלות הגבוהה של פיתוח פולימרים חדשים שתכונותיהם יענו על הדרישות ההולכות ומחמירות מצד מעבדי פולימרים; קצב הפיתוח של חומרים אלה לא הדביק את הדרישה. הגורם השני היא העובדה שבאמצעות תרכוב ניתן לתפור חומר בעל מגוון רחב של תכונות רצויות ולענות בכך על צרכים ספציפיים של מעבד זה או אחר. בדרך זו הפך ענף התרכוב לקטליזטור של תעשיית הפלסטיקה בכללותה. הענף כולל בתוכו טכנולוגיות ליצירת נתכים ותערובות, מתאמים (compatibilizers), וכן טכנולוגיות חדשות

המכירות של חברת התרכוב הגדולה בעולם, A. Shulman, עלו מ-464 מיליון דולר ב-1987 ל-598 מיליון דולר ב-1988. החברה הקימה בשנת 1988 שותפות עם חברת מיצובישי היפנית ומיצרת כעת תרכובים על בסיס PVC עבור תעשית הרכב בצפון אמריקה. לחברה גם משפחה של שרפי PP משוריינים בשם Polyforts הנראים כמו נייר, אך אינם נקרעים ונחונים בעמידות למים שמנים וממסים שונים. החומר ניתן לעיבוד באקסטרוזיה ומשמש תחליף לנייר בשימושים שונים וכן כמגשי חימום בתנורי מיקרו-גל וכאריזה למוצרי מזון שונים. חברת Ampacet מייצרת מגוון רחב של חומרים וביניהם חומרים מסדרת Poly-grade המתכלים תחת חשיפה לשמש. מוצר חדש בשם Poly-grade II הוא תוסף המאיץ את פירוקם של חומרים פלסטיים הקבורים באדמה (landfill). לחברת General Electric יש כעת (לאחר רכישת Borg-Warner) כ-20 מוקדי תרכוב ברחבי העולם; כעשרה בצפון ודרום אמריקה, ששה באירופה, שלושה באוקיינוס השקט ומתקן אחד בכל אחת מדרום קוראה, יפן ואוסטרליה. חברת תרכוב גדולה נוספת היא Akzo המתרכזת בייצור חומרים יחודיים (speciality materials). העליה השנתית בייצור היה כ-14%-12 בשנות השמונים ומגמה זו צפויה להמשך גם בשנים הקרובות. כ-40% מתפוקת החברה היא על בסיס PA, כ-20% על בסיס PP ו-PC כל אחד, והשאר מתחלק בין ABS ופולימרים לטמפרטורות גבוהות. חברות אחרות בעלות קוי תרכוב מפותחים הם Du Pont, BASF, ICI, Polycom Huntsman, Mobay ו-Teknor Apex [13]. עובדה זו משקפת את המגמה הנוכחית של forward integration שבה חברות הענק שעד עתה התרכזו ביצור פולימרי היסוד פותחות קוי תרכוב ותופרות חומרים לפי דרישת הצרכן. במסגרת זו פתחו לאחרונה חברות Dow ו-Solvay קוי תרכוב משלהם.

מוצרי תרכוב המשמשים להחלפת מתכות מכילים זכוכית, aramid, גרפיט ומיקה. מוצרים אחרים מכילים מייצבים (stabilizers) לעמידות בפני מים, בסיסים וממסים שונים. תרכוב נעשה לעתים על מנת לשפר את המראה האסתטי של החומר. הוספת סיבי גרפיט מצופי ניקל מובילה לתוצר תרכוב בעל מוליכות חשמלית.

עם העליה בדרישה לתרכובים פותחו מכונות חדשות מתוחכמות יותר לביצוע המשימה בשילוב מגוון רחב של אמצעי עזר. ההערכה היא שבעבר עלות האקסטרוזר הווה כ-80% מהעלות הכללית של קו תרכוב. עם עליית תחכום קוי התרכוב ירד חלקו של האקסטרוזר בעלות הכוללת לכ-15%-20. קוי תרכוב כוללים כיום מזינים מורכבים המסוגלים למדודו בדיוק גבוה את הכמות של כל מרכיב מוסף, אמצעים למדידה

on-line של צמיגות וצבע וכן מערכות בקרה בחוג סגור (closed loop) [13]. עיקר ההתקדמות בתחום התרכוב הוא הודות להבנה מעמיקה יותר של משתני התפעול, יכולת השליטה בטמפרטורה, מהירות הבורג, דרגת העירבוב, רמת הואקום, מיקום כניסת התוספים וגדלים אחרים הקובעים את טיבו של המוצר הסופי [15].

יצרני הציוד מספקים עתה מגוון רחב של מכונות עבור תחום רחב של ספיקות ותכונות. מספר דוגמאות לכך מובאות להלן. החברה הגרמנית Werner & Pfleiderer מספקת עתה אקסטרודרים דו-בורגיים בעשרים גדלים שונים. אקסטרודרים לתרכוב מהווים את המרכיב המרכזי במערכות ייצור אינטגרטיביות של חברה זו; לדוגמא, PP היוצא את הריאקטור עובר מודיפיקציה כימית באקסטרודר על מנת לתת שרף בעל צמיגות נמוכה המתעצב בתבניות במהירות. מערכת בקרה בחוג סגור מבקרת את כמות הפרוקסיד המוסף ושומרת על צמיגות קבועה. מוקדים פעילים בתהליך grafting של silane לפוליאטילן לינארי מושגים ע"י הוספת פרוקסיד להתך. הרכב ההומר מבוקר ע"י ספקטרוסקופיה אינפרא-אדום ודרגת הצילוב (הבלתי רצוי) מבוקר on-line ע"י ראומטר. האקסטרודר מצליח לעבד את החומר בעל הצמיגות הגבוהה, למנוע זיהומים ולבקר את זמן השהיה. הנטיה בחברת Berstoff היא לבנות אקסטרודרים קטנים יותר לתרכוב, המאפשרים מעבר להרכב חדש תוך שינויים קלים בלבד. חברה זו מציעה אקסטרודרים דו-בורגיים (co-rotating intermeshing) ב-17 גדלים שונים בתחום 25 - 305 mm. למכונות אלה היכולת לווסט את הספקת האנרגיה לפולימר ללא צורך להחליף בורג. למערבלים הרציפים של חברת Farrel ספיקות בתחום 25 - 75,000 lbs/hr. צורת הלהבים, המרווחים (clearances) ויחסי L/D ניתנים לשינוי עבור שימושים שונים.

חברות ציוד רבות בונות כעת קוי ייצור המבוססים על הבנה טובה יותר של תהליך התרכוב. סקירה נרחבת של הנעשה במספר חברות ציוד מובא במקור [15].

המגמה הנוכחית היא לירידה במספר המתרכבים העצמאיים בארה"ב. מספרם של אלה באירופה הוא קטן, והם מרוכזים בעיקר באנגליה. ביפן כמעט ואין מתרכבים עצמאיים. חברות עיבוד רבות מעדיפות לרכז את אספקת החומרים בידי מספר מצומצם של ספקים גדולים הפותחים קוי תרכוב במגמה של forward integration. יצרני תרכובים טוענים שיש עתה עליה במודעות של מהנדסי התכנון ליכולת של תרכובים לשפר את תכונות שרפי הבסיס ולמלא דרישות ספציפיות של המוצר הסופי על בסיס כדאיות כלכלית.

תרכובת ראקטיבית (reactive compounding) - ספקי חומרים ומתרכבים מתחרים על מגזרים צרים ע"י תפירת חומרים לפי דרישות הצרכן. רמת תחכום אחת מעל לתרכובת פשוט (המבוסס על ערבוב מכני של מרכיבים שונים), הוא התרכובת הראקטיבית שבו מודיפיקציות כימיות משמשות להשבחת תכונות המוצר. הסיבות לשימוש בטכנולוגיה חדשה זו שבה מכונת התרכובת משמשת גם כראקטור כימי הן שתיים: מחיר הייצור הוא נמוך יותר ו/או מוצר התרכובת הוא טוב יותר. ההערכה היא שהעלות לפיתוח פולימר חדש (החל מפיתוח מעבדתי דרך מתקן pilot ועד למסחור החומר) היא כביליון דולר. אין להצדיק הוצאה כזאת כשצרכן היעד הוא מגזר צר של השוק (niche).

נדגים את יעילות התרכובת הראקטיבית ע"י דוגמא: יש ליצור נתך מפולימרים A ו-B אשר יהיה בעל התכונות הטובות של שני מרכיביו. הבעיה היא ש-A ו-B אינם קומפטיבליים כאשר מערבבים אותם ללא מודיפיקציה, ותוצר הערבוב הוא ירוד בתכונותיו. נדרשת דרך לשפר את האדהזיה הבין-פאזית בין A ו-B. קיימות מספר שיטות על מנת לצמד פולימרים בלתי תואמים: צילוב, יצירת רשתות חודרות זו לזו (Interpenetrating networks, IPNs) ו-grafting ע"י שימוש בחומר מתאם. לא נדרשת דרגה גבוהה של דמיון כימי על מנת ליצור IPN, ולכן ניתן בדרך זו לקבל מוצר המשלב תכונות של פולימר תרמופלסטי ותרמוסטטי. שיפור האדהזיה הבין-פאזית ע"י שימוש ב-grafted copolymers מאפשר את ייצורו של נתך סינרגיסטי. מודיפיקציה בעזרת גומי משמש במספר מערכות כגון PS (HIPS) ו-ABS.

רוב הריאקציות דורשות טמפרטורות, לחצים, חומרי בניה, סלוק תוצרי לווי וזמני שהיה שאינם מתאימים ליצור אקסטרוזיה או תרכובת קונבנציונלי. מכאן שיש לבחור במערכות המתאימות ליצור תרכובת סטנדרטית; אולם גם תהליך פשוט דורש לכל הפחות ערבוב יעיל של מרכיבים בעלי צמיגויות שונות, שליטה מדוקדקת בטמפרטורה, מספר תחנות הוספה לאורך הציוד, חומר בניה עמיד מבחינה כימית (תכולה גבוהה של כרום בפלדה עד כדי 14%) ויכולת לסלק אדים. הציוד המשמש לתרכובת ראקטיבית כולל את רוב סוגי הציוד לתרכובת פשוט: אקסטרודרים חד- ודו-בורגיים, מערבלי Banbury ומכונות ליש (kneaders). ברוב המערכות התלת-מרכיביות, מגיבים ראשית את אחד מפולימרי הבסיס עם החומר המתאם ומוסיפים את פולימר הבסיס השני במורד התהליך. בד"כ הריאקציות מלוות בשחרור אדי מים, ממסים, איניציאטורים ותוצרי לווי גזיים. עובדה זו מצריכה אמצעי איטום מיוחדים.

דוגמא טיפוסית למצב בו גורם שלילי הפך לגורם חיובי היא מודיפיקציה של פוליאולפין. פוליפרופילן וקו-פולימרים המבוססים עליו הינם בלתי יציבים בתנאים מסוימים בגלל חולשתו של קשר פחמן-מימן. חמצן או רדיקלים פראוקסידים עשויים לנתק קשר זה, וליצור בכך אתר בשרשרת הפולימר לראקציה graft. ניתן לבצע grafting למגוון אוליפינים על מנת לשנות את תכונות השרף. מונומרים פולריים כגון חומצה אקרילית או מלאיק אנהידריד משמשים להחדיר תכונות פולריות לשרשרת ולהגביר את התואמות של פוליפרופילן עם פולימרים פולריים יותר כדוגמאת נילון. כשאלסטומרים על בסיס אתילן-פרופילן עוברים מודיפיקציה בדרך זו, התוצר משמש לשיפור הנגיפה (impact modifier) של נילון ושרפים הנדסיים אחרים. כשפוליפרופילן מוגב עם חמצן או פרוקסיד, מתקבל חיתוך שרשראות המתבטא בירידה במשקל המולקולרי והצרה של פילוג המשקל המולקולרי. גם תהליך זה הוא מסחרי ומשמש ליתפירת משקל מולקולרי ע"י רמת הפרוקסיד והטמפרטורה. גם פוליאיתילן נתון להתקפה ע"י קבוצות פראוקסיד. אולם במקרה זה החומר מצטלב עם עצמו במקום לקצר את שרשראותיו. כשדרגת הצילוב מבוקרת, ניתן לשבח תכונות דוגמאת עמידות בחום ועמידות בפני ממסים. זוהי דוגמא נוספת למקרה בו ראקציה פירוק (degradation) הפכה לתהליך תרכוב מסחרי.

תחום חדש יחסית הוא אימידזציה (imidization) של אקרילטים, חומצה אקרילית או קבוצות אנהידריד ע"י אמוניה או חומרים אחרים. לפולימרים המתקבלים עמידות תרמית גבוהה יותר וחודות לפונקציונליות החדשה הם קומפטיבילים עם חומרים אחרים כגון פוליקרבונט ונילון. המפתח להצלחה במקרה זה הוא מיכל ערבוב המסוגל לטפל בצמיגויות גבוהות בזמן הריאקציה.

נמצאה גם דרך לתאם בין פוליסטירן לבין פוליאוליפינים כגון פוליפרופילן. חומר המוצא הוא פוליסטירן בעל פונקציונליות של אוקסזולין (oxazoline). חומר זה עובר תרכוב באקסטרוזיה ויוצר graft עם פולימר המכיל קבוצה פונקציונלית כגון קרבוקסיל או אנהידריד [16,17].

מקורות ספרות לפרק 7

- (1) A Comparison of Technologies - A Review of Processes, Materials, Costs and Markets, The Canadian Plastics Institute, 1989.
- (2) W. Fillmann, Modern Times, in *World Plastics & Rubber Technology*, Cornhill Publications, 1989.
- (3) D. Weeler (based on G. Menges), Injection Molding Process Offers Much More Potential, *European Plastics News*, pp. 21 - 22, January 1990.
- (4) M. R. Fallon, Injection in the 90's; How High Tech?, *Plastics Technology*, pp. 78 - 86, April 1990.
- (5) Injection Machinery and Software Highlight Chicago Fair, *Plastics Technology*, pp. 13 - 17, May 1990.
- (6) Neubauer, Expanding Buisness, in *World Plastics & Rubber Technology*, Cornhill Publications, 1989.
- (7) M. H. Naitove, Blow Moolding in the 90's: CIM is Coming!, *Plastics Technology*, pp. 48 - 54, May 1990.
- (8) G. R. Smoluk, Thermoforming Gets Faster and More Precise, *Modern Plastics International*, pp. 61 - 64, May 1990.
- (9) B. Miller, Resin Transfer Molding Now a Big-League Process, *Plastics World*, pp. 61 - 65, May 1990.
- (10) D. H. Morton-Jones, *Polymer Processing*, Chapman and Hall, 1989.
- (11) P. Edwards, New Materials, Machinery Widen Application Area fo Pultrusion, *Modern Plastics International*, pp. 30 - 35, June 1989.
- (12) J. K. Rodgers, Pultrusion Begins to Win Acceptance for Bigger Structural Applications, *Modern Plastics International*, pp. 33 - 35, July 1990.
- (13) V. Wigotsky, Compounding, *Plastics Engineering*, pp. 27 - 34, February 1989.
- (14) V. Wigotsky, Compounding Builds Wider Potential for Inovation, *Plastics Engineering*, pp. 25 - 34, February 1988.
- (15) V. Wigotsky, The Pressure is on for Top Quality, *Plastics Engineering*, pp. 23 - 27, April 1990.
- (16) P. J. Perron, Unique Materials Produced by Reactive Compounding, *Plastics Engineering*, pp. 47 - 49, December 1988.
- (17) Reactive Compounding Opens New Avenues for Resin Tailoring, *Plastics Technology*, pp. 62 - 65, February 1989.

פ. ק 8. מכונות וציוד לעיבוד פולימרים

לענף ציוד עיבוד פולימרים צפויה התפתחות דינמית עד שנת 2000 שמקורה הן בשיפורים שיעשו בציוד קיימים, והן בתכנון ובנית מכונות עיבוד חדשות. הכח הדוחף להתפתחות זו יהיה שיפור הכלכליות של עיבוד חומרים פלסטיים וכן הוצרותן של שווקים חדשים לחומרים אלה כתוצאה מהמרת חומרים אחרים. עיבוד פולימרים ילך ויעשה מתוחכם עקב אימוץ 'גישת מערכת' ('systems approach') ע"י היצרנים השונים. גישה זו כוללת:

- ★ מערכות בקרה ממוחשבות על בסיס מיקרופרוססורים ואמצעי חישה.
- ★ אוטומציה ורובוטיקה.
- ★ ציוד עזר משופר.
- ★ תכנון משופר שיתבטא בעליה בתפוקת ואיכות המוצרים (פחות פגמים).
- ★ שיפור בקרת המלאי ושנוע אל/מתוך המפעל.
- ★ הרחבת קוי היצור לעיבוד חלקים מורכבים יותר.

עבור המוצרים החדשים המתפתחים יפותח ציוד דור ראשון (first generation machinery). עם הגברת החדירה לשוק, יפתחו יצרני ציוד גירסאות משופרות שתתבטאנה במכונות דור שני ושלישי. תופעה זו היא תהליך מתמשך, והיא עדיין מתרחשת כיום בציוד שפותח לפני עשרות שנים.

חלק מההתפתחויות העתידיות ישפיע גם על גודל המכונות. צפויה דרישה גבוהה לציוד עיבוד פולימרים גדול יותר. לדוגמא, תדרשנה מכונות הזרקה בעלות כח סגירה (clamp force) העולה על 600 טונות עבור חלקי רכב גדולים. צפוי שעל מנת לעמוד בתפוקה הרצויה תדרשנה גם מכונות גדולות יותר לעיבוד יריעות CPET בחום (sheet thermoforming). ציוד לעיצוב בניפוח (blow molding) של פולימרים הנדסיים עבור תעשיית הרכב, רהוט משרדי ומוצרי צריכה ידרש אף הוא.

התחרות שתיוצר בענף ציוד העיבוד תשאיר חלק ניכר מהשוק גם עבור מכונות קטנות וזולות יותר. אחת המגמות הנראות בתוך ארה"ב היא ייצור מוצרי פלסטיק ע"י חברות זרות. בד בבד חברות אלה מיבאות לארה"ב מכונות עיבוד מן החוץ (בעיקר מכונות הזרקה). בטווח הקצר רוב התחרות בארה"ב

תהיה מצד יצרנים אירופאים, ואילו בטוח הארוך התחרות צפויה מצד מדינות שכלכלתן קשורה באופן הדוק יותר בזו של ארה"ב, ושמחיר כח האדם בהן זול יחסית. בקבוצת מדינות אלה נכללות לדוגמא טאיון, דרום קוריאנה וברזיל.

תהיה עליה במספר הכולל של היצרנים של ציוד עבור השווקים הצפויים לגדול בצורה משמעותית. לדוגמא מספר החברות שיצרו צינ לעיבוד PC לתקליטורים עלה משתיים ב-1985 ל-12 ב-1987. מספר יצרני התקליטורים עצמם הוא קטן בהרבה. פער זה מקל על חברות חדשות לחדור למגזר זה של השוק.

צפויה גם עליה בתחרות בין ספקי ציוד העזר (כגון מיקרופרוססורים ומערכות בקרה ממוחשבות) הן של ספקים מקומיים בארה"ב והן של חברות זרות. התחרות מחוץ לארה"ב תהיה בעיקר מצד חברות יפניות ואירופאיות.

מכירות של ציוד עיבוד יושפעו באופן סלקטיבי מהאטות כלכליות הצפויות עד שנת 2000. ההשפעה של האטות אלה תורגש במידה פחותה בציוד עיבוד עבור מוצרים מסורתיים. המגמה של המרת חומרים אחרים בפלסטיק תמשך גם במשך תקופה של האטה כלכלית, ביחוד אם המרה זו היא כלכלית. באופן כללי צפוי שהגידול במכירות ציוד עיבוד יעלה על הגידול הצפוי במכירות שרפי פולימר ממספר סיבות:

- ★ החלפת מכונות ישנות, מיושנות ובלויות.
- ★ דרישה למכונות חדשות עם הווצרות שווקים חדשים.
- ★ דרישה למכונות עיבוד גדולות יותר לייצור חלקים גדולים יותר. למכונות אלה יהיה זמן מחזור ארוך יותר בגלל דרישות מעבר חום. מכאן הצורך במספר רב יותר של מכונות עיבוד לכל יישום.

טבלה 1 מציגה נתונים מ-1985 ותחזית לשנת 2000 עבור מכירות ציוד עיבוד פולימרים בארה"ב במיליוני דולרים שוטפים. נדגיש כי הנתונים הם דולרים ולא יחידות ציוד. שבר יחידות הציוד המיובאות לעומת שבר יחידות הציוד המיוצרות בארה"ב עולה על זה המוצג בטבלה, לדוגמא, יבוא מכונות הזרקה מהווה מעל ל-50% מסך אלה שנמכרו ב-1985, אולם רוב המכונות שיובאו היו קטנות.

צפוי שהיבוא יחלש בשנות התשעים לאחר גמר הקמת שלוחות של חברות פלסטיקה זרות בארה"ב. החלשות הדולר האמריקאי לעומת מטבעות אחרים יתבטא בעליה במחירי ציוד מיובא. צפוי שהיבוא יקטן

לקראת שנת 2000 עם הקמתן של חברות ציוד זרות בתוך ארה"ב. היבוא בשנת 2000 צפוי להיות כ-30% מזה שבתקופה 1978-1988 [1].

קצב גידול שנתי (%)	2000	1985	
5.0	775	375	הזרקה
4.4	190	100	אקסטרוזיה
7.1	210	75	ניפוח
5.0	115	55	עיבוד בחום
3.7	60	35	אחר*
5.1	1,350	640	סה"כ
5.7	700	305	יבוא לארה"ב
5.3	2,050	945	סה"כ כללי

טבלה 1: נתונים מ-1985 ותחזית לשנת 2000 למכירות ציוד עיבוד פולימרים בארה"ב במיליוני

דולרים שוטפים. (* - RIM, rotomolding וכ"י).

המכירות של מכונות הזרקה עלו בשנת 1989 ב-9% לעומת השנה הקודמת וזאת לאחר קפיצה של 15% בשנים 1987-1988. העליה המשמעותית ביותר היתה במכונות הגדולות יותר עם הגידול הגדול ביותר למכונות הזרקה עם כח סגירה בתחום 4,000-4,999 kN שמספרן עלה ב-104 יחידות המהוות גידול של 86%. המכירות של אקסטרודרים חד-בורגיים ירדו ב-6% לאחר עליה של כמעט 11% בשנת 1988. סך המכירות של ציוד העיבוד בארה"ב עלו על 1.1 ביליון דולר, שמתוכם ציוד תוצרת ארה"ב מהווה כ-743 אלף דולר.

על פי נתונים של משרד המסחר האמריקאי נראה כי היבוא של מכונות הזרקה לארה"ב עלה בכ-4% בתקופה 1988-1989 ואילו היבוא של ציוד אקסטרוזיה עלה ב-13%. מתוך 2,696 היחידות שיובאו לארה"ב, 32.8% היו מיפן (כ-890 יחידות), וזאת לאחר 40% מהיבוא ב-1988. היצואנית השנייה בגודלה של אקסטרודרים לארה"ב היא מערב גרמניה (כ-690 יחידות). התחזית של מחלקת הציוד של איגוד יצרני הפלסטיקה בארה"ב (SPI) היא לא שמכירות הציוד בשנת 1990 תדמנה לאלה בשנת 1989 [2].

סוג הציוד	1988	1989	תוצרת ארה"ב	יבוא
הורקה	564.3	612.4	343.7	268.7
Structural foam	4.6	4.8	4.4	0.4
אקסטרוזיה חד-בורגית	172.5	162.2	120.5	41.7
אקסטרוזיה רב-בורגית	22.0	26.2	16.0	10.2
עיצוב בניפוח	150.0	158.0	123.0	35.0
עיצוב תרמי	85.0	105.0	90.0	14.0
Reaction injection molding	13.5	17.5	14.0	3.5
כבישה	19.0	19.5	18.5	1.0
Thermoset transfer injection	8.0	8.5	7.0	1.5
Expanded bead	10.5	10.0	2.5	7.5
מערבלים (high intensity)	2.5	2.5	2.5	-
סה"כ	1,051.9	1,126.6	743.1	383.5

טבלה 2: מכירות ציוד עיבוד פולימרים בארה"ב ב-1988 ו-1989. הפירוט תוצרת ארה"ב/יבוא

מתיחס לשנת 1989. התנאים הם במיליוני דולר [2].

שימוש מקומי/יצוא		יבוא		כח נעילה [kN]
1988	1989	1988	1989	
355	392	1,741	1,761	0 - 999
392	481	305	316	1,000 - 1,999
349	372	298	312	2,000 - 2,999
388	316	175	191	3,000 - 3,999
120	224	38	51	4,000 - 4,999
171	184	18	19	5,000 - 5,999
132	109	11	17	6,000 - 7,499
78	66	7	13	7,500 - 11,999
31	53	9	15	מעל 12,000
2,016	2,197	2,602	2,696	סה"כ

טבלה 3: מכירות של מכונות הורקה בארה"ב ב-1988 ו-1989. התנאים הם ביחידות ציד [2].

קוטר חבורג [in]	1988	1989
0 - 2.49	294	294
2.5 - 2.99	259	223
3.0 - 3.99	258	263
4.0 - 5.49	172	137
5.5 - 7.49	83	85
מעל 7.5	20	19
סח"כ	1,086	1,021

טבלה 4: מכירות של אקסטרודרים חד-בורגיים מתוצרת ארה"ב ב-1988 ו-1989. הנתונים הם

ביחידות ציוד וכוללים שימוש מקומי ויצוא [2].

היצור הכולל של ציוד עיבוד במערב גרמניה עלה ב-1989 ב-12% לעומת השנה הקודמת. מכונות הזרקה עלו ב-15% ואקסטרודרים ב-7.6%. היצור של ציוד קלנדריה הוכפל. היצור באיטליה עלה ב-16%. היצוא מתוך מדינה זו עלה ב-21%, בעיקר הודות לעליה ביצוא של ציוד קלנדריה ועיצוב תרמי. גם בבריטניה היצור הכולל של ציוד עיבוד פולימרים עלה ב-16% ב-1989 יחסית ל-1988. רוב הגידול נובע מהכפלת יצור האקסטרודרים בבריטניה בתקופה זו. כמחצית מהיצור בצרפת יוצא מתוכה. היצור ביפן עלה ב-11% בעיקר הודות לעליה ביצור ציוד הזרקה.

סוג הציוד	1988	1989
מכונות הזרקה	462	539
אקסטרודרים	308	370
ציוד כבישה	62	62
ציוד עיצוב בניפוח	69	77
סח"כ	901	1,043

טבלה 5: מכירות של ציוד עיבוד באיטליה ב-1988 ו-1989. הנתונים הם במיליוני דולר [2].

סוג הציוד	1989	% השינוי לעומת 1988
מכונות הזרקה	718,500	+15.0
אקסטרודרים	635,570	+7.6
ציוד עיצוב ביפוח	200,730	-8.0
ציוד עיצוב בחום	145,810	+7.9
Compression presses	45,090	-19.5
Other presses	90,110	+64.6
Reaction foaming	112,390	+16.9
Other foaming	44,190	-3.0
ציוד גריסה	171,840	+4.0
מערבלים ומתרכבים	49,220	+18.8
קלנדריה וטחנות גלגלים	62,330	+99.8
טיפול תרמי	16,570	+28.4
ציוד אחר לתרכוב	413,470	+20.2
תבניות	279,890	+11.9
אביזרים וחלפים	449,360	+10.4
סה"כ	3,435,070	+11.1

טבלה 6: יצור ציוד עיבוד במערב גרמניה ב-1989 והשינוי לעומת 1988. הנתונים הם באלפי דולר וכוללים נתונים ממערב ברלין [2].

סוג הציוד	1988	1989
מכונות הזרקה	6.1	2.3
אקסטרודרים	9.6	20.7
אחר	78.4	90.5
חלפים	10.7	14.3
סה"כ	104.8	127.8

טבלה 7: מכירות של ציוד עיבוד בבריטניה ב-1988 ו-1989. הנתונים הם במיליוני דולר [2].

1989	1988	סוג הציוד
1,409,360	1,280,400	מכונות הזרקה
500,080	447,060	אקסטרודרים + אביזרים
23,040	31,780	מכבשי כבישה
39,400	24,830	ציוד עיצוב בניפוח
64,900	50,670	ציוד קלנדריה, עיבוד בחום וקצף
2,036,780	1,834,740	סה"כ

טבלה 8: יצור של ציוד עיבוד ביפן ב-1988 ו-1989. הנתונים הם באלפי דולר [2].

סוג הציוד	מקומי	יצוא	סה"כ
מכונות הזרקה	62,740	19,560	82,300
אקסטרודרים	5,280	880	6,160
ציוד עיצוב בניפוח	12,860	33,400	46,260
ציוד עיצוב בחום	550	-	550
מכבשים	11,380	340	11,720
מערבלים ומתרכבים	26	-	26
ציוד גריסה	4,520	1,710	6,230
ציוד הלחמה	10,750	5,690	16,440
אחר	5,470	490	5,960
חלפים	9,740	2,060	11,800
קלנדריה	330	-	330
סה"כ	123,650	64,130	187,780

טבלה 9: יצור של ציוד עיבוד בצרפת בתשעת החודשים הראשונים של שנת 1989. הנתונים הם באלפי דולר [2].

מדינה	1987	1988	% שינוי
אוסטריה	297,000	312,000	5.24
קנדה	468,000	583,000	24.7
הודו	25,000	20,000	-20.0
איטליה	1,700,000	1,925,000	13.6
יפן	1,494,840	1,837,063	22.9
בריטניה	91,700	104,200	13.7

טבלה 10: מכירות של ציוד עיבוד במדינות שונות בשנים 1987 ו-1988. הנתונים הם באלפי דולר לגבי איטליה נראה כי הציוד שהובא בטבלה 5 מהווה כמחצית מן המכירות [3].

ציוד עזר (auxiliary equipment) - ציוד עזר הינו חלק בלתי נפרד של תעשיית הפלסטיקה וצווד עמה לקראת דיוק רב יותר, איכות גבוהה יותר, עליה בתפוקה וכלכליות היצור. הציוד הנכלל בקטגוריה זו כולל בין היתר מזינים, מצננים, יחידות סחרור מים, ציוד טיפול במוצקים, מתקני אחסנה, אמצעי ייבוש, מגרסות, יחידות שנוע ובקרים שונים. ברובו הגדול, ציוד העזר מתפקד באופן עצמאי, אולם מספר הולך וגדל של יחידות ציוד נדרש לעבוד בשילוב מתוחכם עם יחידת הציוד העיקרית. דעה אחת אומרת כי מקומן של החברות המיצרות אך ורק ציוד עזר ילך וידעך מאחר וחברות ציוד העיבוד העיקרי תחלנה ליצר מערכות שלמות שתכלולנה גם את ציוד העזר. מגמה זו תוגבר עם עליית מידת האוטומציה של תהליכי העיבוד. כנגד, טוענים יצרנים בלעדיים של ציוד עזר כי מקומם מובטח גם בעתיד.

עולה מספרן של קוי היצור המוזמנים ע"י המעבד בצורת turnkey, ז"א קוי יצור המסופקים בשלמותן ללא התערבות המזמין. מדווח כי כ-20% מקוי האקסטרוזיה החדשים מסופקים בדרך זו יחד עם יחידות הזנה, יחידות להוספת תוספים שונים ומערכות ליצור גרגיגים (pelletizers). עובדה זו נובעת בין היתר מקיצוצים בכח האדם ההנדסי של המעבדים.

מעמדו של ציוד העזר עולה ומתקרב לזה של יחידת העיבוד העיקרית. הדיוק הנדרש מיחידה כזו, לדוגמא מכונת הזרקת, אינו בר-השגה אם ציוד העזר אינו מתפקד כהלכה. שינוי טמפרטורת התבנית כתוצאה של פעולה לקויה של מצנן, למשל, עשוי לגרום לירידה דרסטית באיכות המוצר. עם העליה ביכולת הבקרה המושגת ע"י מיקרו-מחשבים עלה הצורך בציוד עזר איכותי הניתן לבקרה באמצעים אלה. אחת

המגבלות שהיו קיימות בתחילת עידן הבקרה המתקדמת של תהליכי עיבוד פולימרים (בערך שנת 1985) היתה חוסר התקשורת בין יחידות ציוד של יצרנים שונים. יחידות הציוד של איגוד יצרני הפלסטיקה האמריקאי (SPI) לקחו על עצמן לפתור בעיה זו של חוסר קומפטביליות ע"י תוכנה המובנית לתוך יחידות הציוד וע"י התקנת תקשורת סטנדרטית באמצעות יציאה מסוג RS 232 או RS 485. אופציה זו מוצעת לחברי ה-SPI תמורת \$2,500 וללא-חברים תמורת \$5,000. כיום ישנן מערכות יצור שלמות הנשלטות באינטגרציה ע"י מחשב (computer-integrated manufacturing, CIM) החולש על כל ציוד העיבוד וציוד העזר. מערכות אלה מסוגלות לעתים להתריע כעשרים דקות לפני יצורו של מוצר פגום, וזאת על סמך מדידה רצופה של פרמטרים והשוואה כנגד בסיס נתונים הידועי איזה שילוב פרמטרים יניב מוצר פסול.

יחידות ציוד העזר הן מתוחכמות יותר גם בפני עצמן, ובחלקן מותקנים מערכות בקרה עצמאיות להורדת צריכת האנרגיה או לשמירת איכות המוצר. יצרני הציוד מדווחים כי המעבדים מתיחסים גם לעיצוב החיצוני של ציוד העזר, והם מיועדים גם לנקודה זו בתכנון הציוד. המגמה הנראית עתה בציוד הזנה וערבוב היא מעבר לבקרה וולומטרית לבקרה גרביטרית. הסיבות למעבר זה כוללות בין היתר את השימוש בתוספים יקרים יותר, דרישות מחמירות יותר באשר להרכב החומר, הצורך להמנע מהזנת יתר של מרכיבים מסוימים והדרישה להוריד את כמויות החומר השארי המופנה למחזור.

ציוד העזר הולך ומשתכלל. בין יתר השכלולים נמצאים בקרת טמפרטורות מדויקת יותר, עבודה בשילוב עם מערכות ממוחשבות ותכנון טוב יותר של מחליפי חום. מיבשים משתמשים עתה במקורות אנרגיה אלטרנטיביים כמו גז טבעי ואנרגיית RF. תכנון סילונים מאפשר פעולה גמישה יותר, גם עם חומרים קשי-זרימה. מערכות בקרה מתקדמות מספקות דוחות מלאי וכן תקשורת מתוחכמת בין יחידות ההזנה ויחידות הציוד העיקריות. מערכות גריסה של חומר שארי שופרו גם הן, וכוללות להבים משופרים, ואמצעים להפחתת רעש וחום.

מקורות ספרות לפרק 8

- (1) **Plastics: A.D. 2000; Production and Use Through the Turn of the Century (1987).**
- (2) **Machinery Statistics, Modern Plastics International, pp. 71 - 73, May 1990.**
- (3) **International Status Report on Plastics for 1988, International Plastics Associations Directors.**
- (4) **Auxiliary Equipment, Plastics Engineering, pp. 23 - 30, July 1989.**

פרק 9: תיב"מ (CAD/CAM) וייצור משולב מחשב (CIM)

תיב"מ

שיתוף פעולה הדוק בין ספקים ומשתמשים סופיים הוא אחד הגורמים המגבירים את ההצלחה של הנתוח ההנדסי הממוחשב של מוצר פלסטי ושל האוטומציה בתהליכי עיבוד שונים. השימוש הנכון בתכנון וייצור בעזרת מחשב (תיב"מ) מבטל את הצורך בבניית מספר רב של אב טיפוסים ומקצר את הזמן הדרוש להגיע לתנאי יצור אופטימליים. יש לזכור כי תיב"מ הוא כלי עבודה המשרת את היצרן ולא מטרה בפני עצמה. ניצול מירבי של טכנולוגיה זו מחייבת הבנה טובה של גורמים רבים, ביניהם חומרה, תוכנה, ראלוגיה ושיטות עיבוד להכנת כלים (tooling).

עבור רבים בתעשיית הפלסטיקה תיב"מ הוא עדין תעלומה. אולם, בו בזמן שרבים נרתעים מלהשתמש בתיב"מ, מערכות המחשבים נעשות יותר חזקות עם שיפורים משמעותיים בזמני תגובה ויכולת עיבוד הנתונים. הירידה הדרסטית במחירי מחשבים מאפשרת עתה ליצרנים קטנים להשתלב בטכנולוגיה מתקדמת הנעשית חיונית להיותם בני תחרות.

אחד השטחים המציעים אפשרויות נרחבות לתיב"מ הוא יצור תבניות ממוחשב, אם כי מספר היצרנים בארה"ב המיצרים תבניות ע"י תיב"מ הוא עדיין קטן. אם המוצר המיוצר הוא צעצוע זול או אביזר נוי כלשהו, אין הצדקה להשקיע בתיב"מ. אולם, אם הכוונה היא ליצר מוצר הנדסי במידות מדויקות הצריך לעמוד בעומס עבודה, חיוני לשקול כיצד ניתן להגיע למוצר בעל תכונות מכניות אופטימליות ולהביא בחשבון אפקטים של התכווצות והתמצקות. רוב המתכננים והמעבדים נשענים בבואם לתכנן תבנית הזרקה על נסיון שנצבר ע"י עיסוי וטעיה (trial and error). אך מאחר וצידוד הזרקה עבור חלקים הנדסיים גדולים עשוי לשקול 30 טונות ולעלות כ-\$150,000 ברור שהדבר מצריך שיקולים רבים. למעשה, רוב היצרנים מיצרים קודם תבנית אב-טיפוס עשוי אלומיניום בטרם נבנית התבנית הסופית. אולם גם תהליך זה עשוי להיות ממושך ויקר. טכניקות תיב"מ ניתנות לישום במספר דרכים; ראשית ניתן לשרטט בעזרתן את צורת התבנית ובו זמנית ליצר מידע המועבר לכרסומת ממוחשבת (CNC). בנוסף, שמוש בשיטת האלמנטים הסופיים לחשובים נומריים של מאמצים המתפתחים במוצר מאפשר תכנון אופטימלי של תבניות. ניתן לחזות את מהלך הזרימה לתוך התבנית, את מידת ההתכווצות של החלק בתבנית ואת נקודות התורפה של המוצר הסופי. לשיפור האסתטיקה של המוצר ניתן גם לשלוט בזרימת ההתך כך שקוי זרימה בולטים יתקבלו דוקא באזורים שיכוסו אח"כ בכיסויים שונים. השימוש במחשב לצרכים אלה תלוי בידיעת שני

מרכיבי מפתח: התכונות המכניות של החומר הפלסטי וכיצד אלה מושפעים מהיסטורית הזרימה של החומר; ותכונות ההתכווצות של החומר הפלסטי וכיצד אלה תלויים בחסטרורית הזרימה והקרור של החומר. השוואה בין נסיונות מעבדתיות לבין תחזיות ממוחשבות מראה כי ניתן להגיע לתוצאות מדויקות כאשר מביאים בחשבון אפקטים של זרימה בניתוח מאמצים והתכווצות של חלקים מעוצבים בהזרקה לתבניות [1,2].

חבילת התוכנה המוכרת ביותר לנתוח זרימה לתבניות פותחה ע"י חברה אוסטרלית והיא ידועה בשם Moldflow. התוכנה נמכרת כיחידה עצמאית המותקנת אצל המעבד או כמנוי ברשת תקשורת. למרות פרסומה, תוכנה זו מוגבלת באשר היא משתמשת במודל חד-מימדי בכל חישוביה. בגרסה האחרונה של תוכנה זו (גרסה 6) שופר אופן חצגת התוצאות, ונכללה האופציה לחצגה גרפית של לחצים וטמפרטורות כפונקציה של מיקום וזמן. תוכנה צרפתית בשם Atochem Billion CEMEF (ABC) משתמשת במודל דו-מימדי. תוכנה זו הרצה על Micro-Vax II אינה נמכרת לציבור הרחב, והחברה מציעה שירותי תיב"מ הניתנים למעבדים. ישנן גם תוכנות אחרות המתאימות למעבדים הנרתעים מנתוח ע"י אלמנטים סופיים ולכאלה אשר מרגישים כי מסת היצור שלהם אינה מצדיקה השקעה גדולה בתיב"מ. דוגמא לתוכנה כזו היא SIMPOL הרצה על מחשב אישי IBM PC או תואם. תוכנה אחרת בשם Synthesis עובדת בשילוב עם תוכנת ה-AutoCAD הפופולרית שנכתבה גם כן ל-IBM PC. מדווח כי לתוכנה זו כ-1,500 משתמשים בארה"ב שחלקם טוען כי עבודה משולבת בחבילות התוכנה Synthesis ו-AutoCAD קצרה את זמן תכנון התבנית ב-80%. נשיא Fehrman Tool & Die טוען כי מאז החלה החברה בתיב"מ קצב אספקת תבניות ללקוחות עלה ב-20%. חברות ענק דוגמאות Du Pont משתמשות גם במחשבי-על (super-computers) לשימושי תיב"מ. בהשוואה לשמונה שעות שנדרשו לפיתוח מודל על מיני-מחשב גדול, נדרשים רק 20 דקות במחשב-על. המגמה הנוכחית אצל יצרני התוכנות היא להתגבר על מחסום הרתיעה שיש לחלק מהמעבדים מפני שימוש בתיב"מ וליצר חבילות תוכנה שתהינה יותר ידידותיות (user friendly) [1-4].

אספקט מענין של תיב"מ הוא יצור אב טיפוסים בזמן קצר ביותר. טכנולוגיה חדשה הקרויה סטראו-ליתוגרפיה (StereoLithography) משתמשת בפוטוכימיה ובפולימרים נוזליים על מנת ליצר אב טיפוס ללא צורך במכונת עיבוד. שיטה זו בונה חלקים מורכבים ע"י סדרה של שכבות פוטופולימר המונחות אלה על גבי אלה ומניבים מבנה תלת-מרחבי. החתכים (השכבות) של הפולימר 'מודפסות' ע"י מכשיר ליזר אולטרא-סגול הנשלט ע"י מחשב. הפולימר הנוזלי מתקשה רק במקומות בהם פוגעת קרן הליזר. השכבות השונות נדבקות האחת לשניה בגלל תכונות הפולימר ויוצרות את הצורה התלת-מימדית השלמה. בשלב הסופי החלק נחשף לאור או לחום להקשיה מושלמת. מגוון רחב של פוטופולימרים שקופים ואטומים יכולים

לשמש בתהליך זה. משך יצורו של אב טיפוס ע"י סטראו-ליתוגרפיה מתקצר מחודשים למספר שעות. השיטה מאפשרת לחברות לפתח מוצרים חדשים בזמן קצר יותר ולחדור לשוק מהר יותר. המאמץ המושקע ביצור קונבנציונלי של אב טיפוסים הוא גדול מאוד ובהיקף גדול. לדוגמא, חברת הרכב האמריקאית General Motors מיצרת כ-250,000 מודלים ואב-טיפוסים מדי שנה. משך הזמן הממוצע ליצור אב טיפוס הוא כחודשיים בעלות של כ-\$30,000 [5]. חברת Intergraph פתחה מערכת אינטרפייס לקשר בין תוכנת התיב"מ שלה - Intergraph's Engineering Modeling System (I/EMS) - לבין מערכת הסטראוליתוגרפיה [6].

מספר חברות מספקות מוצרי תיב"מ ושירותי תכנון ממוחשבים:

Advanced CAE Technology Inc., Warren Road Buisness Park, 31 Dutch Mill Rd., Ithaca, NY 14850, USA.

Advanced Plastics Design Inc., 4350 Glendale-Milford Rd., Suite 210, Cincinnati, OH 45242, USA.

D-M-E Co., 29111 Stephenson Hwy., Madison Heights, MI 48071, USA.

Gerber Systems Technology Inc., 425 Sullivan Ave., So. Windsor, CT 06074, USA.

Moldflow Ltd., Colchester Road, Kilsyth, Victoria 3137, Australia.

Plastics & Computer di C. Campi, Via Ippodromo 9, I-20151 Milan, Italy.

Structural Dynamics Research Corp., Gunnels Wood House, Gunnels Wood Road, Stevenage Hertfordshire, SG1 2NW, England.

ייצור משולב מחשב

העליה בעלויות הייצור היא מהכוחות הדוחפים להעלאת הפריזון, העלאת האיכות והקטנת מלאים. יצרנים ומעבדים גדולים כקטנים בתעשית הפלסטיקה החלו להשתמש בייצור משולב מחשב - CIM - Computer Integrated Manufacturing. השימוש ב-CIM מצריך שימוש ברשת מקומית (LAN) לתחנות עבודה מפוזרות על פי רצפת הייצור. ניתוח האינפורמציה הוא השלב העיקרי והוא מבוסס על סימולטור מחשב המתאר באופן מדויק את תהליך הייצור במפעל על מרכיביו השונים כגון חומרים, מכונות, כלים וכו'. על ידי הזנת "דרישת" הייצור. הסימולטור נותן את התוצאה החזויה בכל תחנות העבודה. בעיות מאותרות, שינויים מוכנסים עד לקבלת התוצאה הרצויה. כתוצאה משילוב המחשב בייצור, מדווחים המשתמשים בהקטנת מחיר חומרי הגלם, הבנה מעמיקה של בקרה על התהליך, איתור בעיות במוצרים, מכונות וכלים, ובקרת מלאי, בקרה על עבודה בתהליך, זימון משאבים מדויק.

במערכות CIM מתקדמות קיים קשר מחשבי עם מערכות התיב"מ, בסיס חנותיים הניהולי והחשבונות [7].

חברות המספקות מערכות CIM:

1. Allen Bradley, 1201 South Second St. Milwaukee, WI 53204, U.S.A.
2. Burr-Brown International Ltd., 1 Millfield House, Woodshots Meadow, Watford, Herts WD1 8YX, England.
3. IBM Europe, Tour Pascal, La Defense 7 Sud, Cedex 40, F-92075, Paris la Defense, France.
4. Oracle Corp. International Div. 20 Dan's Drive, Belmont Ca. 94002, U.S.A.

מקורות ספרות לפרק 9

- (1) T. Shelley, The CAD Men Cometh, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, 1989.
- (2) R. V. Wilder, CAD/CAE/CAM in Moldmaking: A Precision Tool for Profitability, Modern Plastics International, pp. 65 - 67, May 1990.
- (3) C. Austin, Go With the Flow, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, 1989.
- (4) V. Wigotsky, Computers and Plastics, *Plastics Engineering*, pp. 27 - 37, April 1989.
- (5) C. Hull, The Missing Link, in *World Plastics and Rubber Technology*, Cornhill Publications Limited, 1989.
- (6) M. R. Fallon, The Latest in CAD/CAM Shown at AutoFact '88, *Plastics Technology*, pp. 15 - 23, January 1989.
- (7) P. Godden, Computer Integrated Manufacturing Systems, *Modern Plastics International*, pp. 24-27, July 1990.