

Plast Teknologi

Udvalgt sektion

Materialeegenskaber, der har indflydelse på termoformprocessen

Næsten alle glasklare termoplast er amorfe, men ikke alle amorfe termoplast er glasklare, da de kan være modifieret eller indfarvet. Delkrystallinske termoplastmaterialer er på grund af den delvist ordnede molekylstruktur ikke glasklare, men derimod mere eller mere uigennemsigtige afhængigt af krystalliniteten.

Amorfe og delkrystallinske termoplast har et begrænset anvendelses-temperaturområde. Under glasovergangstemperaturen (T_g) er materialerne ofte sprøde. Med stigende temperatur reduceres materialets stivhed og styrke, derimod stiger dets formningsevne, hvilket muliggør termoformning. Den øvre anvendelsestemperatur er begrænset af den nødvendige materialestivhed. Inden for et temperaturinterval kan materialets termisk længdeudvidelseskoefficient antages at være lineær. Ved opvarmning af plastplader kan følgende forskelle observeres: Amorfe materialer kan formes allerede ved temperatur over glasovergangstemperaturen (blødgøringstemperaturen). Hvilken temperatur der anvendes ved formningen, er dog afhængig af materialet og den anvendte proces. Ved vakuumformning anvendes højere temperatur end ved trykformning.

Delkrystallinske termoplast er aldrig fuldstændigt krystallinske, men har amorfe og krystallinske områder. Hvis materialet har lav krystallinitet, er det muligt at forme materialet lige under den krystallinske smeltetemperatur (T_m). Ved højere krystallinitet må man anvende højere formningstemperatur end T_m .

Ligger anvendelsestemperaturen af et færdigt emne af et delkrystallinsk materiale højt, eller skal materialet fx kunne steriliseres ved høj temperatur, må emnet for at kunne forblive stabilt have været næsten fuldstændigt smeltet ved formningen. Det betyder, at formningstemperaturen må vælges tilstrækkeligt højt. Det vil sige, at man med stigende formningstemperatur mindsker de spændinger, der opbygges i materialet ved formningen. Dette gælder også for amorfe materialer.

Typiske termoplast, der forarbejdes ved termoformning

Amorfe:

PVC, PS, SB, SAN, ABS, ASA, PMMA, PC, PPO, CA, CAB, CP, PSU og PES

Delkrystallinske:

PEHD, PELD, PP

Optagelse af fugt

Folier og plader af termoplast kan optage vand (de er hygroskopiske), hvis materiale eller additiver er

hygroskopiske, fx talkum, sod og visse farvestoffer. Hygroskopiske plastmaterialer er fx ABS, ASA, CA, ekstruderet PMMA, PC, PET-A, PSU, PES og ikke mindst PA.

Hygroskopiske råvarer pakkes normalt lufttæt, og der åbnes først i forbindelse med forarbejdningen, da der ellers optages fugt fra åbningen af pakken til forarbejdningen (det er dog tit alligevel nødvendigt at ud-tørre materialet). Det er svært at bestemme et materiales fugtighed med enkle midler. Hvis materialet er fugtigt, vil der ved formning opstå blærer i overfladen af pladen. Det er derfor nødvendigt at fortørre hygroskopisk materiale, der er fugtigt, for at kunne forarbejde det. Ved normal luftfugtighed kan plastplader/folier opbevares relativt kort tid i fri luft, inden det er nødvendigt at fortørre igen. Denne tid er dog afhængig af pladernes tykkelse, og om de ligger i en stabel eller på en rulle. Hvis leverandøren ikke medsender udtørningsdata, kan man anvende fortørningstemperatur og -tider i tabellen "Egenskaber ved termoform-materialer", der findes senere i dette kapitel.

Materialerne udtørres i en ovn. Det er vigtigt, at pladerne placeres sådan, at tørreluften kan cirkulere omkring begge sider af pladerne.

Materialernes friktion ved termoformning

Materialernes friktion spiller en rolle ved termoformning, hvis materialet skal glide på formværktøj eller overstempel under formningen. Det sker fx ved anvendelse af overstempel til forstrækning af materialet ved negativformning og ved pladens berøring af formen, når denne køres op under positivformning.

Hvis friktionen er meget høj, klæber materialet til form eller overstempel ved første berøring, og yderligere strækning af materialet i dette område er umuligt. Hvis friktionen er meget lille, fx ved anvendelse af beklædte overstempler eller overstempler af PTFE, glider materialet let over kontaktfladen. Det kan give problemer, hvis man ønsker at få et tykt bundområde i en negativform. Det går ikke, hvis materialet glider for let over overstemplet, der derfor ikke "låser" nok materiale og derfor ikke bringer det med ned i hullet. Bunden af et sådant område vil derfor altid blive tyndt.

På formsiden bliver friktionen bestemt af:

- Formmaterialet
- Værktøjstemperaturen på kontaktfladen
- Overfladeruheden

På materialesiden bliver friktionen bestemt af:

- Materialet mod formen (fx ved coekstruderede plader)
- Overfladebehandling og beskaffenhed (evt. antiblock, slipmiddel, talkum)
- Materialetemperatur ved formkontakt

Praktiske tips mod klæbning

- Materialet glider lettere over let sand eller glasblæste eller let håndslebne værktøjsoverflader end ved hårdt sandblæste eller højglanspolerede overflader. Kun ved positivværktøjer, hvor materialet glider hurtigt over hjørnerne, bør disse hjørner højglanspoleres.
- Hvis materialet har en tendens til at klæbe til formen, kan friktionen mindskes ved at sænke formtemperaturen.
- Coekstruderede materialer kan være særligt slemme til at klæbe til formen, især hvis materialerne har meget forskellig formningstemperatur. Ved coekstruderede plader af ABS og PMMA er der normalt ingen problemer, da de to materialer har næsten samme formningstemperatur. Derimod kan der opstå problemer ved formning af coekstruderet PS og PE, hvor PE ved den nødvendige formningstemperatur for PS kan være meget klæbende.
- Form ved så lav formningstemperatur som muligt.
- Opvarm den klæbende side mindre end den modsatte.
- Hvis den klæbende side er mod formen, så anvend så kold en form som muligt.
- Hvis den klæbende side er mod et overstempel, så anvend et overstempel af PTFE eller et aluminiumoverstempel beklædt med PTFE.
- Hvis materialet er med antiblockbelægning, skal man være ekstra påpasselig, da ændring i antiblockbelægningen kan medføre problemer.

Krymp og formsvind

Ved krymp forstår man ved termoformning den mål-ændring, en plade eller et emne får ved opvarmning. Det er en fordel, hvis man inden formning undersøger materialets krymp ved hjælp af en krympetest på pladen.

- Man laver et udsnit på ca. 200 × 200 mm og laver en nøjagtig opmåling af udsnittet. Målene noteres, og ekstruderingsretningen markeres på pladen.
- En varmluftovn opvarmes til materialets formningstemperatur.
- Udsnittet lægges oven på en talkumbestrøet PTFE-film, der er fastgjort på et bræt. Udsnittes pudres også med talkum ovenpå og dækkes løst med en PTFE-film, der fæstes på brættet med nåle, hvorefter det hele placeres i ovnen.

- Brættet skal blive i ovnen i minimum 30 min plus 5 min for hver 0,5 mm pladetykkelse.
- Når denne tid er gået, tages brættet og pladeudsnittet ud af ovnen og afkøles.
- Herefter opmåles pladeudsnittet igen, og følgende beregning laves:

Krymp i % =

$$\frac{(\text{mål før opvarmning} - \text{mål efter opvarmning}) \times 100}{\text{mål før opvarmning}}$$

For at fastslå om der er anisotropi, anbefales det at måle krympet både i længde- og tvær-retningen (ekstruderings- og maskinretningen). Hvis der ved en ny leverance af plader er problemer med folder, udtrækning af rammen, eller for stort krymp ved opvarmning, kan sammenligning med tidligere leverancer være nyttig. Forskellige fremstillingsparametre hos de to partier giver forskellige krympeprocenter og dermed forskellig opførsel ved termoformning.

Anisotropi

Anisotropi er det forhold, at materialer har forskellige egenskaber i forskellige retninger.

Ved formsvind forstår man de målforskelle, der findes mellem formen og emnet. Man kan opdele formsvindet i forarbejdningsvind og eftersvind:

$$\text{Formsvind i \%} = \frac{(\text{formmål} - \text{emnemål}) \times 100}{\text{formmål}}$$

Målene på form og emne skal tages 24 timer efter formningen og ved 23 °C, hvis man vil følge normen. Ved visse plasttyper kan der afhængigt af forarbejdningsbetingelser allerede efter kort tid i stuetemperatur måles et eftersvind.

Hvis det ved efterfølgende forarbejdning er nødvendigt at fastholde det formede emne i en fikstur, fx ved

CNC-fræsning, er det nødvendigt at kende det samlede svind.

Svind og krymp af emner medfører, at størrelsen af snit- og stanseværktøjer skal fastlægges med stor præcision, specielt ved emballagemaskiner, hvor emnerne snittes eller stanses ud umiddelbart efter formning, og em- net derfor stadig er varmt og stadig svinder. En anden mulighed er at lave snit- og stanseværktøjerne, så de kan justeres, så man kan opnå den ønskede størrelse.

Svindværdier hos udvalgte plasttyper kan findes i tabellen "Egenskaber ved termoform-materialer".

Værdierne er omtrentlige, da de varierer med de forarbejdningsparametre, der er anvendt ved fremstilling af pladen. Helt præcise svindværdier kan kun fastlægges ved prøveførsler af materialet i formen eller i en form, der ligner den meget.

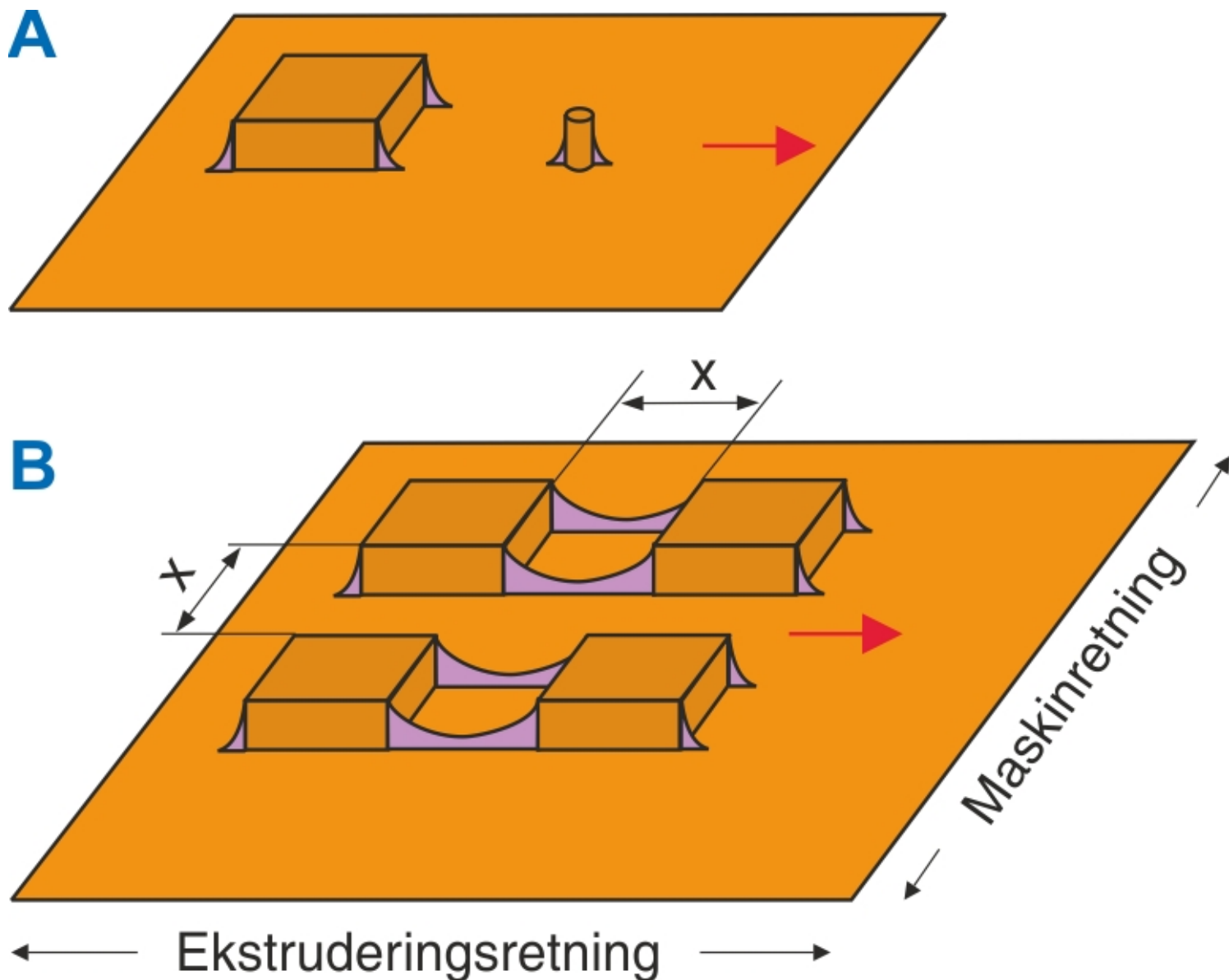
Faktorer, der har indflydelse på svindet

- Materialet, hvor man skal være opmærksom på, at der kan være forskelle på de enkelte leverancer
- Høj afkølingshastighed giver lille forarbejdningsvind
- Høj afformningstemperatur giver større svind
- Store formændringer giver for det meste mindre svind
- Fremstillingsparametre for pladen. Med det samme granulat kan man ved at ændre på parametrene ved ekstrudering af pladen eller ved at skifte ekstruder ændre på pladens svind
- Positivformede emner har for det meste ubetydeligt mindre svind end negativformede emner
- Ved formning i plader fra samme leverance forekomme variationer i svindet på maksimalt $\pm 10\%$ af det normale materiales svind

Ved måling af svind skal man vælge en målemetode, hvor eventuelle deformationer af em-net ikke måles med. Man skal aldrig acceptere tættere tolerancer på det færdige emne end $\pm 10\%$ af svindet på målet. Dette betyder, at tætteste tolerance på 500 mm ABS vil blive 500 mm (længde) $\times 0,006$ (0,6 % svind) $\times 0,1$ ($\pm 10\%$) = $\pm 0,3$ mm.

Orientering

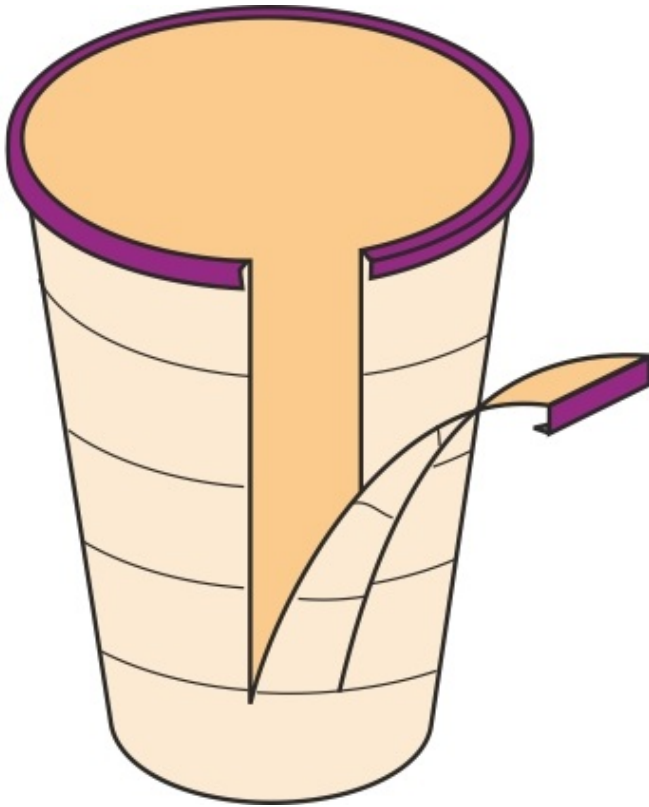
Krympetesten, der er omtalt ovenfor, giver også oplysninger om den orientering af molekylerne, der er i pladen eller emnet. Hvis pladen har meget stor orientering i fx ekstruderingsretningen, kan det bevirke, at der opstår finner (folder). Ved flerstyksværktøjer, hvor der er samme afstand imellem formene i længde- og tværretningen, vil muligheden for og størrelsen af finnerne være meget større i ekstruderingsretningen end i maskinretningen.



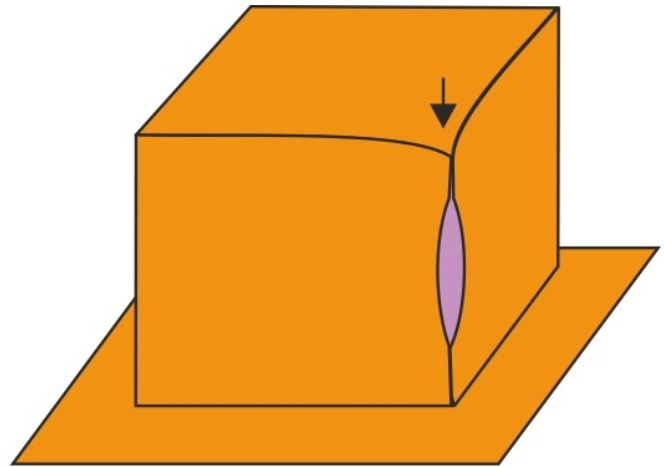
Finnedannelse som følge af molekylorientering i pladen

A. Ved etstyksform B. Ved flerstyksform

Ved termoformning af pladen dannes yderligere orientering af molekylerne, idet orienteringen stiger med den strækning, der foretages. Billedet herunder viser et termoformet bæger af PSHI (SB), der let revner i længderetningen. Derimod er den enkelte stribe materiale meget stærk i længderetningen, fordi materialet er stærkt orienteret i denne retning. En stærk orientering af materialet ved termoformning forringer materialets styrke vinkelret på orienteringen og kan dermed føre til revner i strækretningen.



Revner i et rundt bæger på grund af stor orientering



Revne i orienteringsretningen på et kantet emne

Statisk opladning af termoplastiske plader

Med undtagelse af elektrisk ledende materialer (plader), fx kulfyldte, galvaniserede og metalliserede plader og lignende antistatiske be-lægninger, bliver termoplastiske plader opladet med statisk elektricitet ved:

- Afrulning fra en rulle
- Aftagning fra en stabel
- Aftrækning af beskyttelsesfolie
- Opvarmning
- Afkøling

En uheldig følge af statisk opladning er, at støv og større partikler som sav- eller fræsespåner af plast bliver tiltrukket og til sidst formet eller brændt ind i pladens overflade. Det kan medføre kassering af emner, hvor der er store krav til overfladen. Problemet kan løses eller mindskes ved at:

- Flytte bearbejdning, der giver støv og spåner, til et andet lokale
- Blæse pladerne rene med ioniseret luft (ionluftpistol)
- Afbørste pladerne med en kulfiberbørste, der er jordforbundet

Plastemner vil også tiltrække støv efter formningen, hvis de er fremstillet uden antistatisk behandling. Man kan mindske problemet i begrænsede perioder ved at afvaske emnet i sulfovand.

Termoplasts opførsel ved opvarmning

Vigtige faktorer ved opvarmning af termoplastiske plader/folier er:

- Opvarmningstiden
- Længdeudvidelsen og nedhænet
- Pladens/foliens (materialets) trækstyrke ved formningstemperaturen
- Størrelsen af formningstemperaturområdet
- Temperaturvariationen gennem pladens/foliens tykkelse

Faktorerne gennemgås i de følgende afsnit.

Opvarmningstidens indflydelse

Opvarmningsmetoden har indflydelse på opvarmningstiden.

Opvarmningstiden på en plastplade er ved anvendelse af samme indstilling af maskinen afhængig af:

- Materialetype (PS, ABS, PVC, PC osv.) og materialets farve
- Pladetykkelse

Opvarmningstiden er overproportional med pladens tykkelse, da plast er en dårlig varmeleder. Den korteste opvarmningstid findes, når begge sider af pladen opvarmes med højest mulige temperatur (effekt). Denne findes, hvor pladens overfladetemperatur ligger lige under den temperatur, hvor plasten tager skade (materialet nedbrydes). I praksis begynder man ved den maksimaltemperatur (effekt), man har til rådighed, og derefter sænker man den, til man har et emne med fejlfri overflade. Ved alle plader, der opvarmes på denne måde, vil der være et fald i pladens temperatur ind mod pladens midte. Størrelsen af temperaturfaldet er afhængigt af den temperatur (effekt) og den opvarmningstid, man har anvendt. Hvis dele af pladen efter opvarmningen og ved formningen ikke har den krævede formningstemperatur, kan den ikke formes eller kun formes med uskarpe kanter. Da det ikke er muligt at måle pladens temperatur ned gennem dens tykkelse uden at ødelægge den, kræver indstillingen af optimale opvarmningsparametre (effekt og tid) stor erfaring.

En plade med en lille variation i temperaturen ned gennem tykkelsen (en langsomt opvarmet plade) vil

være lettere at forme, og det færdige emne vil være mere holdbart (have bedre mekaniske værdier). En plade, der er opvarmet ved maksimal effekt, vil få dårligere godsfordeling og have ringere holdbarhed (mekaniske værdier). Plader med tykkelse op til 2,5 mm kan, hvis der er opvarmningstid nok til rådighed, opvarmes fra én side. Ved plader med tykkelse over 2,5 mm bør der anvendes tosidig opvarmning. Slagfast PS (SB) anvendes ofte som referencemateriale i oversigter over opvarmningstider. Kender man opvarmningstiden på et givet emne i PS, kan man beregne en cirka-opvarmningstid for andre materialetyper ved at gange med en materialefaktor.

Længdeudvidning og nedhæng

Ved opvarmning af en plastplade i en termoformmaskine vil der, indtil pladen har opnået formningstemperaturen, ske følgende:

- Frem til blødgøringstemperaturen vil materialet udvide sig (der dannes "bølger", da pladen er fastholdt i rammen).
- Efter overskridelse af blødgøringstemperaturen vil indefrosne spændinger i pladen udløses, hvorved højtorienterede materialer som orienteret PS eller PELD vil strække sig op i rammen. Andre, mindre orienterede materialer vil fortsat udvides og begynde at hænge i rammen.
- Ved opvarmning med strålevarme findes to problemer:
 - Hænger pladen frit ned, vil den ud over nedhæng på grund af udvidelsen hænge yderligere ned på grund af dens egenvægt. Derved kan pladen hænge så langt ned, at den kommer i berøring med undervarmen og derved skades.
 - Hvis pladen "holdes oppe" med støtteluft, dannes bølger. Da top og bund af sådanne bølger er tættere på varmelegemerne og derfor opvarmes mere, medfører det, at man ikke kan opvarme pladen ensartet, hvilket medfører dårligere kvalitet i det færdige emne.

Formningstemperaturområdet

Formningstemperaturområdet er bestemt af:

- Den laveste temperatur, hvor pladen lige præcis kan formes med tilstrækkelig fuldformethed (skarphed)
- Den højeste temperatur, hvor pladen ikke skades termisk

Omtrentlige værdier af formningstemperaturer for forskellige materialer kan findes i tabellen "Egenskaber ved termoform-materialer".

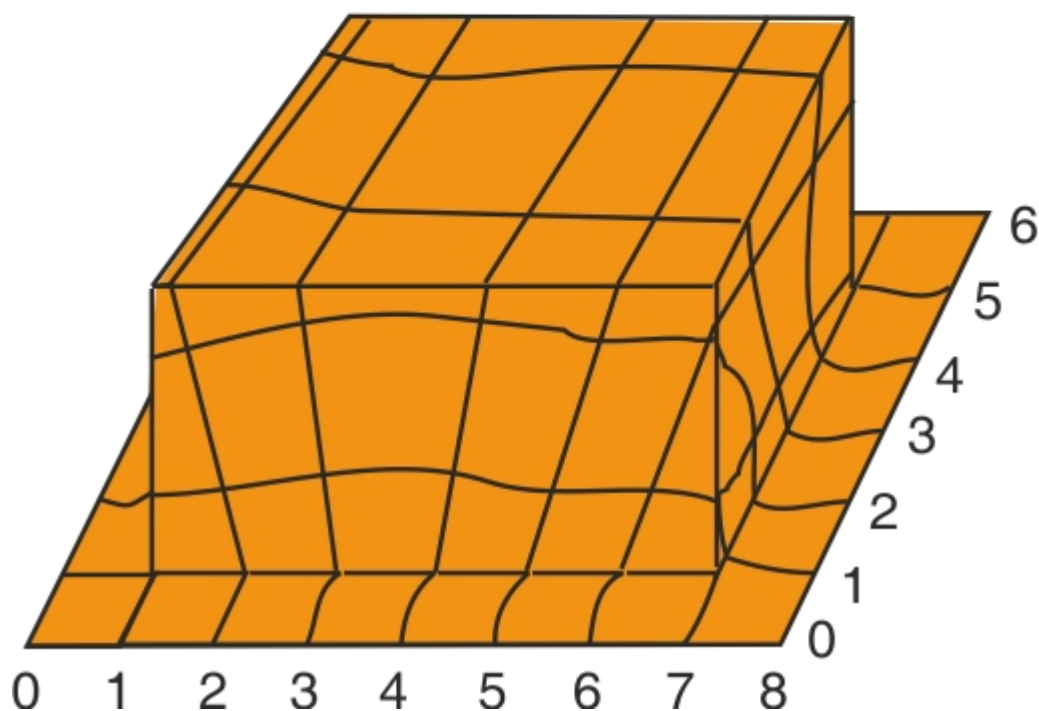
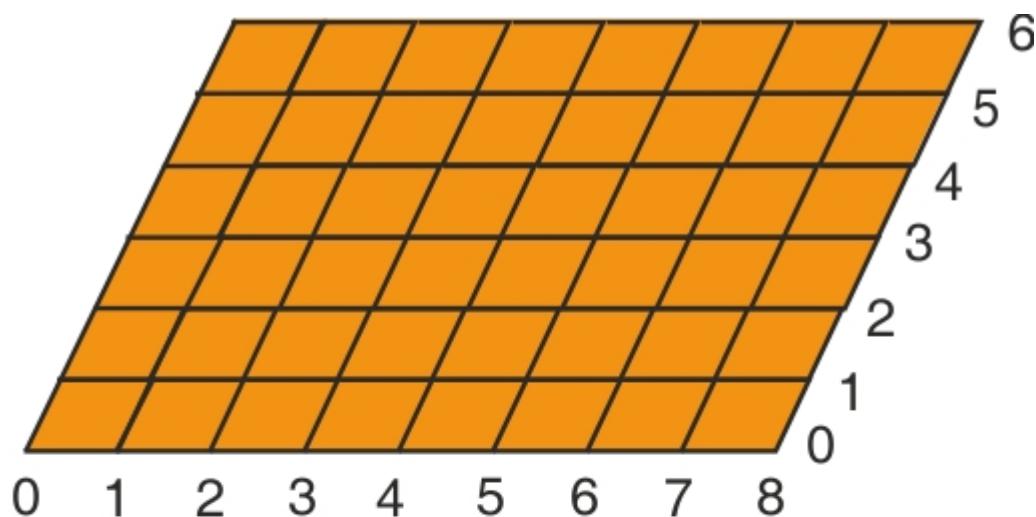
Ved termoformning er hovedformålet med opvarmning af plastpladen, at den får en ensartet temperatur

over hele formningsfladen. Det er ved strålevarme derfor nødvendigt, at rammerne har god refleksion.

Strækning af pladen

Alle termoplast har et temperaturområde, hvori de kan strækkes meget. I dette formnings-temperaturområde er relativt små kræfter nok til at forme emnet. Kan termoformmaskinen ikke frembringe den nødvendige kraft, må man varme materialet yderligere op, så man kan opnå den ønskede fuldformethed. Det betyder, at man ikke længere er i det område, hvor man har den maksimale strækevne. Man kan se problemet ved positivforme, hvor der er krav til små radier i flangeområder, fx ved formning af inderskabe til køleskabe, eller ved små bundradier i negativforme, fx ved drikkebægre. Jo større kravet er, desto længere fjerner man sig fra området med maksimal strækbarhed. Dette medfører, at godsfordelingen bliver dårligere, og emnet får meget tynde områder på siden. Ved for høje krav bliver processen ustabil, og selv små variationer i pladens tykkelse eller i pladetemperaturen fører til kasserede emner.

Hvis man vil undersøge strækningen af pladen, kan man tegne et gittermønster på den. Ved større plader kan man afpasse størrelsen af de enkelte felter, så de passer med størrelsen af maskinens varmeelementer. Efter formningen kan man ud fra ændringen af de enkelte felters areal vurdere pladetykkelsen i feltet. Er arealet blevet dobbelt så stort som startarealet, vil pladetykkelsen være halveret, da volumen af plast i feltet jo er konstant.



Undersøgelse af pladens strækning ved hjælp af et indtegnet gitter i en passende størrelse

A. Gitteret på pladen B. Gitteret på det formede emne

Fuldformethed

Ved fuldformethed forstår man den nøjagtighed af formens overflade, em-net opnår. Her ses især på små radier og aftryk af formoverfladen. Følgende faktorer har især indflydelse på emnets fuldformethed:

- Materiale
- Pladetykkelse
- Pladens formningstemperatur (her ser man på temperaturen gennem hele pladens tykkelse og ikke kun på overfladetemperaturen)
- Formningskræfterne ved tryk- eller vakuumformning
- Formtemperatur
- Luftafgangen i formen (hvor let det er for luften at blive suget væk)
- Formningsforhold

I de følgende afsnit gennemgås faktorerne

Materialer

PS, PE, PP, ABS og PPO er materialer, der let lader sig forme med høj fuldformethed, hvorimod PC, PET-A og visse PVC-typer kun kan få høj fuldformethed under visse betingelser.

Pladetykkelse

Jo tykkere en plade er, jo sværere er det at opnå høj fuldformethed.

Formningstemperatur

Fuldformetheden bliver bedre, jo højere temperatur der formes ved. Der findes dog undtagelser ved PET, der begynder at krystallisere under opvarmningen. Man skal dog huske på, at det er temperaturen i pladens kerne, der er afgørende, hvorfor det ved plader over 4 mm kan være nødvendigt at mindske den intensitet (effekt, temperatur), pladen opvarmes med, for at kernen kan nå at blive varm, inden overfladen begynder at nedbrydes.

Formningskraft

Jo højere formningskraft man anvender, jo lettere opnås fuldformethed. Ved maskiner, hvor man kun har en ringe kraft til rådighed (fx vakuum-formmaskiner), kan der i stedet for anvendes højere formningstemperatur.

Formtemperatur

Jo højere formtemperatur, desto bedre fuldformethed opnås.

Luftafgang

For at opnå god fuldformethed er det nødvendigt, at den luft, der ved formningens start findes mellem plade og form, kan komme væk. Hvis det ikke er tilfældet, risikerer man at få luftindeslutninger, det vil sige steder, hvor pladen ikke kan komme i kontakt med formen, fordi der er en "boble" af luft, den ligger på.

Formningsforhold

Ved større strækning af pladen kræves højere formningskraft for at opnå samme grad af fuldformethed.

Termoplastens opførsel under køling

Pladen begynder at køles, i det øjeblik den ikke opvarmes længere, fx ved tilbagekørslen af over- og undervarmen. Når selve formningen starter, skal materialet have formningstemperatur, derfor er det nødvendigt at opvarme pladen til lidt over formningstemperaturen, så der er "plads" til et mindre temperaturfald. I praksis betyder det, at tiden mellem opvarmning og formning skal være så kort som muligt.

Under formningen begynder intensiv køling af materialet der, hvor det er i kontakt med formen. Effekten af denne køling vokser med formkontakten. Under formningen skal materialet have den nødvendige formnings-temperatur for at opnå fuldformethed.

Køletiden ved termoformning afhænger af følgende faktorer:

- Materiale
- Pladetykkelsen efter formning
- Formningstemperatur
- Afformningstemperatur
- Formmateriale
- Formtemperatur
- Kontakten mellem form og plade
- Kølingen af den pladeside, der ikke vender mod formen

Materiale

Plastene har forskellige værdier af specifik varme (varmefylde, specifik varmekapacitet), hvilket betyder, at der er forskel på, hvor megen energi der skal tilføres for at varme dem lige meget op. Fx er den specifikke varme for PP ca. 1,5 gange så stor, som den er for PS, så der skal tilføres 1,5 gange så megen varme for at opvarme til samme temperatur, og tilsvarende at der skal fjernes 1,5 gange så megen

varme under kølingen.

Man kan anvende PS som udgangsmateriale ved beregning af den nødvendige køletid for et nyt materiale, idet man ganger køletiden for PS med det nye materiales materialefaktor for køling.

Pladetykkelsen efter formning

Kølingen af materialet er afhængig af den overflade, der køles på, jo større formningsforhold, jo tyndere bliver pladen, og jo større areal har den.

Kølingen kan sluttes, når emnets tykkeste sted er kølet ned til en tem-pe-ratur, hvorved det kan afformes. Da det ikke er muligt at måle temperaturen inde i kernen af pladen, køler man, indtil emnet er formstabilt ved afformning.

Formningstemperatur

Ved højere formningstemperatur skal der fjernes mere varme. Det medfører, at køletiden forlænges.

Afformningstemperatur

For det meste er afformningstemperaturen lidt lavere end materialets blød-gøringstemperatur. Ønskes emnet mere formstabilt ved afformningen, må der køles i længere tid.

Formmateriale

De forskellige formmaterialer har forskellig evne til at transportere varme – fx er træ isolerende, mens aluminium leder varmen godt. Kølingen af materialet er mere effektiv i forme, der leder varmen godt, hvilket be-tyder, at køletiden vil blive kortere.

Formtemperatur

Lavere formtemperatur giver kortere køletid. Formtemperaturen kan ikke vælges frit, men bliver bestemt af:

- Materialet
- Den krævede fuldformethed
- Pladetykkelsen efter formning: Hvis begge sider af den formede plade ikke afkøles lige hurtigt, opstår der spændinger i materialet, hvilket kan føre til deformationer
- Emneformen: Rotationssymmetriske emner kan afformes varmere end emner med plane sider

Ved termoformning er afkølingen bedre på formsiden end på den anden side. I tabellen herunder er der

vist en sammenligning mellem en række kølemetoder.

Varmeovergangsværdier ved forskellige kølemetoder	
Kølemetode	Varmeovergangsværdier i W/m² × °C
Køling med stillestående luft	5,7
Luftkøling med blæser	57
Luftkøling med vandtåge	570
Kontakt med aluminium	mod uendelig

Man kan forbedre luftkølingen ved at:

- Øge lufthastigheden
- Rette blæsere mod emnets tykkeste steder
- Have udgangen af luftblæserne så tæt på formen som muligt
- Anvende vandtåge i luften
- Anvende kold luft