



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

PE-membraners levetid i byggeriet

et litteraturstudie

Rasmussen, Torben Valdbjørn; Møller, Eva B.; Steenstrup, Frederik R.; Nielsen, Jens Kromann; Ottosen, Lisbeth M. ; Petersen, Louise Green; Hansen, Morten Hjørsløv ; Shashoua, Yvonne

Publication date:
2018

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Rasmussen, T. V., Møller, E. B., Steenstrup, F. R., Nielsen, J. K., Ottosen, L. M., Petersen, L. G., Hansen, M. H., & Shashoua, Y. (2018). *PE-membraners levetid i byggeriet: et litteraturstudie*. SBI forlag. SBI-rapport Bind 1 Nr. SBI 2018:11

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

SBI 2018:11

PE-membraners levetid i byggeriet:
et litteraturstudie



PE-membraners levetid i byggeriet: et litteraturstudie

Torben Valdbjørn Rasmussen
Eva B. Møller
Frederik R. Steenstrup
Jens Kromann Nielsen
Lisbeth M. Ottosen
Louise Green Petersen
Morten Hjorslev Hansen
Yvonne Shashoua

Titel	PE-membraners levetid i byggeriet: et litteraturstudie
Serietitel	SBi 2018:11
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2018
Forfattere	Torben Valdbjørn Rasmussen (SBI), Eva B. Møller (SBI), Frederik R. Steenstrup (TI), Jens Kromann Nielsen (TI), Lisbeth M. Ottosen (DTU), Louise Green Petersen (DTU), Morten Hjørsløv Hansen (BYG-ERFA), Yvonne Shashoua (Nationalmuseet)
Redaktion	Lise Lotte Beck Raunkjær
Sprog	Dansk
Sidetæl	39
Litteratur- henvisninger	Side 34-38
English summary	Side 39
Emneord	Dampspærre, membran, plast, polyethylen, PE, genanvendelse, byggematerialer, materialeegenskaber, fugt, levetid, holdbarhed, klimaskærm
ISBN	978-87-563-1900-3
Fotos Omslagsill.	Se de enkelte illustrationer Niels Samsø Nielsen
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven

Indhold

Indhold	3
Forord	4
Indledning	5
PE-membraner i byggeriet	5
Plastgenanvendelsespolitik i EU	6
Projektets formål	7
Sammenfatning	9
Hvad er polyethylen?	10
Fremstilling af polyethylen	10
Varianter, egenskaber og anvendelser af polyethylen	13
Genanvendelse af polyethylen	14
Typen af polyethylen-membraner	15
Polyethylen-membraner af jomfrueligt materiale	15
Polyethylen-membraner af nyt materiale	15
Polyethylen-membraner af regenerat	16
Polyethylen-membraner af lagdelt materiale	17
Materialeegenskaber for forskellige typer membraner	17
Polyethylen-foliers anvendelse og funktion	21
Generel anvendelse	21
Undersøgelse af polyethylen-membraners anvendelse i byggeriet	21
Ældningsmetoder	23
Ældning af polymerer	23
Ældning af polyethylen:	24
Additiver i dampspærrer	26
Ældningsformer for plast	27
Diskussion	31
Litteratur	34
English summary	39

Forord

Membraner af polyethylen (PE) anvendes i stor udstrækning i Danmark som dampspærremembran. Når en membran af PE anvendes som dampspærre i en konstruktion, vil membranen typisk også udgøre lufttætningsplanet i de dele af konstruktionen, hvor den sættes op. Membranen skal således sikre tilstrækkelig lufttæthed og dampdiffusionsmodstand i klimaskærmen. Den samles og fastgøres med tape eller klæber til bygningens øvrige bygningskomponenter i tæthedsplanet, fx vinduer, døre og tunge bagvægge.

PE-membraner kan være fremstillet af ren PE, regenereret PE eller en kombination heraf. Med den store opmærksomhed på genanvendelse af materialer er det forventeligt, at en stigende andel af membraner fremstilles af regenereret PE eller en kombination af ren og regenereret PE.

På nuværende tidspunkt er det uvist, om PE-membraners ydeevne afhænger af, om de er fremstillet af ren PE, regenereret PE eller en kombination heraf. Det er problematisk, hvis levetiden af nogle membraner er kortere end levetiden for de konstruktioner, som de er bygget ind i. Hvis et dampspærresystem svigter eller mister sin luft- og dampspærende egenskaber, kan det resultere i store og dyre indgreb i den konstruktion, dampspærresystemet er bygget ind i. Når det sker, opstår der risiko for, at der kommer råd, svamp og dårligt indeklima i bygningen. Samtidig kan man forvente, at bygningens energiforbrug stiger pga. den manglende lufttæthed, et svigtende dampspærresystem medfører.

Denne rapport redegør for kendt viden om egenskaber og ændringer af egenskaber over tid for PE-membraner anvendt i byggeriet. Der er indsamlet viden i fagfællebedømt litteratur og lærebøger om de typer PE-membraner, der anvendes i dampspærresystemer i Danmark. Det er sket via databaser, der er almindeligt anvendt af danske universiteter. Litteraturstudiet dækker dampspærresystemer med PE-membraner, der er produceret af rent PE, regenereret PE eller en kombination heraf. Beskrivelsen omfatter PE-membranernes produkttegenskaber, kemiske sammensætning, struktur og stabilitet og ændrede materialeegenskaber ved ældning. Fokus er på PE-membraner anvendt i byggeri i et klima, der er sammenligneligt med det danske.

Seniorforsker Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI, AAU har ledet projektet. Rapporten er udarbejdet i et samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Teknologisk Institut, Nationalmuseet og BYG-ERFA med økonomisk støtte fra Landsbyggefonden, Byggeskadefonden og Grundejernes Investeringsfond.

Arkitekt Lise Lotte Raunkjær, SBI, AAU har støttet det redaktionelle arbejde.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København
Afdelingen for Byggeteknik og Proces
November 2018

Ruut Peuhkuri
Forskningschef

Indledning

PE-membraner i byggeriet

Membraners luft- og damptæthed har afgørende betydning for moderne, isolerede og lette konstruktions funktion og levetid. Det gælder især fugtfølsomme konstruktioner som fx træskeletkonstruktioner. Membraner indbygges for at kontrollere transport af vanddamp og fugtig luft til de isolerede dele af konstruktionerne i klimaskærmen. Når membraner anvendes som dampspærre i en konstruktion, vil membranen typisk også udgøre lufttætningsplanet i de dele af konstruktionen, hvor den sættes op. Membranen skal således sikre tilstrækkelig lufttæthed og dampdiffusionsmodstand i klimaskærmen. En dampspærre forhindrer varm og fugtig indeluft i at trænge ud i isoleringen og blive kølet ned. Hvis varm og fugtig indeluft trænger ud i isoleringen og bliver kølet ned, kan fugtigheden i isoleringen og tilstødende konstruktionsdele øges til et niveau med risiko for vækst af skimmelsvampe, og det kan ske, at fugten kondenserer i isoleringen.

Membraner af polyethylen (PE) er i sig selv meget tætte over for luftgennemtrængning og har en meget høj dampdiffusionsmodstand. PE-membraner kan derfor anvendes til lufttætning og til at øge dampdiffusionsmodstanden i klimaskærmen. PE-membraner har således egenskaber, som betyder, at krav til lufttæthed og modstand mod dampdiffusion kan opfyldes for klimaskærmen i et og samme materiale, forudsat det monteres korrekt i konstruktionen.

Når membranen skal fungere som lufttætningsplan, kræver det, at membranbanerne samles tilstrækkelig lufttæt og ikke perforeres, og at samlingerne efter indbygning forbliver tilstrækkelig lufttætte mellem membranbaner og i tilslutninger til andre bygningskomponenter i lufttætningsplanet.

En dampspærre placeres, så luftfugtigheden på den varme side kan holdes under det kritiske niveau i forhold til risikoen for vækst af skimmelsvampe. Det betyder som håndregel, at den relative luftfugtighed skal holdes under 75 % RF. Varm, fugtig indeluft må således ikke kunne trænge så langt ud i klimaskærmen, at den nedkøles så meget, at den relative luftfugtighed overstiger det kritiske fugtniveau for vækst af skimmelsvampe. PE-membranen placeres så langt inde på den varme side af klimaskærmskonstruktionen, at den er fysisk beskyttet mod perforering. Den placeres ind til en tredjedel ind i den isolerede del af klimaskærmen fra den varme side i væg og loft, mens den kan placeres halvt nede i den isolerede del af konstruktionen mod jord, fx i terrændækket.

I dansk byggeri er det almindeligt i træskeletkonstruktioner at etablere luft- og damptæthedsplanet i et og samme plan ved at indbygge membraner på den varme side af isoleringen. Svigt i membranens funktion kan føre til indklimaproblemer som træk, fodkulde, misfarvning og/eller vækst af skimmelsvampe på indvendige overflader og i værste fald nedbrydning af konstruktionerne. Alt dette kan have store økonomiske konsekvenser i kraft af udgifter til undersøgelse og genopretning til en sund, robust konstruktion.

Luft- og dampspærremembraner er oftest fremstillet af PE. PE-membraner kan være fremstillet af:

- Ren PE
 - Jomfrueligt PE
Jomfrueligt PE er materiale, der ikke tidligere har været formgivet.
 - 100 % ny PE
100 % ny PE er materiale, der ikke tidligere har været anvendt samt afskæringer og restmateriale fra produktionen af jomfrueligt PE. 100 % ny PE indeholder en andel af tilsætningsstofferne fra produktionen af jomfrueligt PE. Kendskabet til mængden af jomfruelig PE i produktionen af 100 % ny PE kan være varierende, hvorfor også kendskabet til tilsætningsstofferne kan være varierende.
- Regenereret PE
Regenereret PE er produceret af indsamlet plast og kaldes også recirkuleret eller cirkuleret plast. Plasten er sorteret, vasket og renses til en kvalitet, som aftales mellem producenten og aftageren af produktet. Sorteringen kan være manuel, så andet materiale end PE frasorteres.
- En kombination af ren og regenereret PE.
De blandede produkter er typisk lagdelte med et bærelag af regenereret PE og et tyndere lag af ny eller jomfruelig PE på den ene eller begge sider af bærelaget.

I dag skelnes der i byggeriet ikke mellem membraner af ren PE, regenereret PE eller kombinationer heraf, såfremt membranerne opfylder samme krav til tæthed ved indbygning. På nuværende tidspunkt er det uvist, om PE-membraners ydeevne afhænger af, om de er fremstillet af ren PE, regenereret PE eller en kombination heraf. Det er problematisk, hvis levetiden af nogle membraner er kortere end levetiden for de konstruktioner, som de er bygget ind i.

Plastgenanvendelsespolitik i EU

40 % af al plast bruges til fremstilling af emballage, og plastemballage er blandt de plastprodukter, som opretholder deres funktion i kortest tid. Derfor er der på europæisk plan stor interesse for at øge genanvendelse af såvel plastemballage som plast i almindelighed. Man ser på muligheder og udfordringer i forhold til hele værdikæden for plast, herunder produktion, anvendelse, affald, indsamling, deponering og genanvendelse.

De centrale punkter blev allerede formuleret i kravene i EU's direktiv 94/62/EF fra 1994 om emballage og emballageaffald, og ændringer blev indført i direktiv 2004/12/EF i 2004. Det centrale budskab i direktivet er, at materialeforbrug, naturskadelige stoffer og tungmetaller i emballage skal minimeres, og at der skal være en plan for, hvordan den brugte emballage kan bruges igen eller bortskaffes. Ifølge direktivet skal emballage kunne opfylde mindst ét af følgende krav, når det bortskaffes: Plasten skal genvindes til andre materialer, forbrændes med energiudnyttelse, komposteres eller bionedbrydes. Direktivet indføres gennem nationale regler i de enkelte EU-lande og er fulgt op af harmoniserede europæiske standarder (EN13427- EN13432). I Danmark blev EU's direktiv indført gennem emballagedirektivet i 1994, som blev implementeret i dansk lovgivning i 1997 gennem bekendtgørelse nr. 298 af 30. april 1997. Bekendtgørelsen blev senest revideret i 2015.

Europa kommissionen vedtog en europæisk plaststrategi 16. januar 2018 i forbindelse med EU Action Plan for Circular Economy, der beskriver en vision for blandt andet EU's direktiv 2004/12/EF om emballage og emballageaffald. Direktivet er fra 2004 og blev revideret i 2015. I 2019 revideres direktivet igen (Europa-Kommissionen, 2018). Målet er, at 10.000.000 tons regenereret plast skal indgå i nye produkter på det europæiske marked i 2025. Plaststrategien beskriver visioner og tiltag med udgangspunkt i de aktuelle udfordringer.

Udfordringer

Produktionen af plast er stigende og forventes på verdensplan at blive fordoblet inden for de næste 20 år. De væsentligste miljøproblemer ved den nuværende praksis for bortskaffelse af plast er fx, at plasten ophober sig på strande, flyder som dynger på verdenshavene og eksporteres som dårligt sorteret plastaffald til lande med andre miljøstandarder end de europæiske (European Commission, 2018). Produktionen af plast skal ses i forhold til efterspørgslen, som alene i 2016 i Europa opgøres til 50.000.000 ton (EU-28 samt Norge og Schweiz), hvoraf 20.000.000 ton efterspørges til emballage og 10.000.000 ton til produkter tilknyttet byggeriet. Emballage og byggeindustrien er de to største enkelttagere af plast. 27.000.000 ton plast ender som affald hvert år (Plastic Europe, 2017).

Visionen

Europa Kommissionen ønsker at al plastemballage genanvendes i 2030. Ved at forbedre plastics værdikæde, så et kasseret produkt af plast kan erstatte nyt materiale og herved repræsentere en lignende værdi, kan affald af plast opnå et vigtigt økonomisk potentiale og øge EU's konkurrencedygtighed. Visionen skal ses i lyset af, at næsten 41 % af plastemballage blev genanvendt i 2016. Genanvendelsesgraden er altså langt højere end de 22 %, direktivet for emballage og emballageaffald krævede ved udgangen af 2008 (Europa-Parlamentet & Rådet for den Europæiske Union, 2015; PlasticsEurope, 2017).

Tiltag

For at fremme genanvendelse af plast vil EU gennemgå og lempe regler for produkter anvendt i konstruktioner og bilindustrien (ELV – End of Life Vehicles). EU overvejer at indføre økonomisk belønning for genbrug af plast i de kommende direktiver om emballage og emballageaffald. På samme måde arbejdes der på at integrere genbrug af plast i de grønne offentlige udbudskriterier og i de europæiske miljømærker Blomsten og Svanen.

EU's støtteprogram for forskning og innovation Horizon 2020 har afsat 250 milliarder til at finde alternative og bæredygtige kilder til råolie som råmateriale til plast. I dag går ca. 5 % af verdens råolieproduktion til fremstilling af plast (<http://www.petroleum.co.uk/plastic-production>). Råolie kan erstattes af planter, enzymer og bakterier. Desuden er 100 milliarder afsat til affaldssortering.

Genanvendelse af plast understøttes af følgende initiativer:

- Kommissionen udgiver en ny vejledning om separat opsamling og sortering af affald.
- Udvidet producentansvar og pantordninger.
- Budskabet om at genanvendelse er en god forretning. At emballage og emballageaffaldsdirektivet kan skabe gode forretninger konkluderer Teknologisk Institut (Teknologisk Institut, 2006)
- Kommissionens kampagne for at man i 2025 genanvender 10.000.000 ton plast i nye produkter på det europæiske marked, fx i isoleringsmaterialer, rør, havemøbler og instrumentpaneler i biler.

Projektets formål

Dampspærremembranerne er oftest fremstillet af PE og kan være produceret af henholdsvis jomfruelig, 100 % ny granulat eller granulat af regenererede produkter eller en kombination af disse. Der skelnes ikke mellem disse principielt forskellige membraner, såfremt de ved indbygning opfylder samme krav til tæthed over for luftgennemtrængelighed og dampdiffusionsmodstand. Med den store opmærksomhed på genanvendelse af plast i byggematerialer og i almindelighed er det forventeligt, at en stigende andel af

PE-membraner fremstilles af regenererede produkter eller delvist regenererede produkter fremover. I dag er genbrug betragtet som noget positivt for miljøet, men det kan være problematisk, hvis levetiden af PE-membranen af regenereret plast er kortere end levetiden for en PE-membran af jomfrueligt eller ny plast – og især hvis den ikke er lige så lang som levetiden for de konstruktioner, som membranen bygges ind i.

Kendskabet er ringe, når det kommer til PE-membraners levetid og betydningen af, om PE-membranen indeholder regenereret, ny eller jomfrueligt plast. Der er derfor behov for at få mere viden om, hvordan egenskaberne for en PE-membran af regenereret plast udvikler sig over tid sammenlignet med, hvordan egenskaberne for en PE-membran af jomfruelig eller ny plast udvikler sig over tid.

Dampspærremembraner fremstillet af ny og regenereret PE er genstand for projektet, fordi denne type membraner indgår i hovedparten af de dampspærresystemer, der anvendes i Danmark. Viser det sig, at der er forskel på dampspærresystemer fremstillet af henholdsvis jomfruelig, ny og regenereret PE, vil denne viden kunne danne grundlag for at undersøge andre typer dampspærresystemer af nyt og regenereret plast.

Projektet skal tilvejebringe viden om de egenskaber, som dampspærresystemer med PE-membraner har, og hvordan disse egenskaber udvikler sig over tid. Den frembragte viden skal især give information om membraners levetid, og hvilke faktorer der har indflydelse på PE-membraners levetid.

I projektet sammenholdes materialeegenskaber for og kemisk sammensætning af PE-membraner af regenereret plast, 100 % ny plast og af jomfrueligt plast. Formålet med at sammenholde denne viden er at kunne vurdere levetiden af de enkelte typer dampspærresystemer af PE. Overordnet omfatter projektet følgende aktiviteter:

- Indsamling af nuværende viden om PE-membraner, herunder produktion af PE-membraner og produkttyper
- Bestemmelse af kemiske og fysiske egenskaber for PE-membraner på det danske marked og for systemløsninger med PE-membraner inklusive samlinger
- Analyse af resultater, herunder vurdering af den forventede levetid af dampspærremembraner af jomfruelig, ny og regenereret PE.
- Formidling af projektets resultater.

Denne rapport er den første af flere rapporter, der udarbejdes i projektet. Rapporten redegør for kendt viden om PE-membraner, herunder produktion af PE-membraner og varianter af membraner af PE.

Gennem litteratursøgning søges information om de forskellige typer af PE-membraner anvendt i dampspærresystemer i Danmark. Der gennemføres en litteratursøgning i databaser almindeligt anvendt af danske universiteter. Søgningen skal give information om de forskellige typer af membraner af PE, der findes på markedet for dampspærresystemer i dag og tidligere. Der søges information i fagfællebedømt litteratur og lærebøger. Litteratursøgningen skal give overblik over dampspærresystemer med PE-membraner, der er produceret af jomfrueligt PE, ren PE og regenereret PE. De søgte oplysninger omfatter produkttyper, egenskaber, kemisk sammensætning, struktur og stabilitet og materialeegenskaber ved ældning, når membranerne anvendes i dampspærresystemer. Fokus er på PE-membraner anvendt i byggeri i et klima, der er sammenligneligt med det danske.

Sammenfatning

Denne rapport er den første rapport i en serie rapporter som udarbejdes i projektet polyethylen-membraners (PE-membraners) levetid i byggeriet. Rapporten indeholder et litteraturstudie knyttet til projektet.

Litteraturstudiet er resultatet af en litteratursøgning, der er gennemført for PE-membraner anvendt i lufttætnings- og dampspærresystemer i byggeriet. Der er gennemført en litteratursøgning i databaser almindeligt anvendt af danske universiteter. Formålet er at give information om de typer membraner af PE, der findes på markedet for dampspærresystemer anvendt i dag og tidligere. Der er søgt information i fagfællebedømt litteratur og lærebøger. Hensigten med litteraturstudiet er at give overblik over den information, der er til rådighed om dampspærresystemer med PE-membraner, der er produceret af henholdsvis jomfruelig, 100 % ny og regenereret PE. Informationen omfatter produkttyper, egenskaber, kemisk sammensætning, struktur og stabilitet og ændring af materialeegenskaber ved ældning. I litteraturstudiet er der lagt vægt på informationer om PE-membraner i byggeri i et klima, der er sammenligneligt med klimaet i Danmark.

Litteraturen indeholder beskrivelser af PE-membranernes produkttegenskaber, kemiske sammensætning og struktur, men meget lidt om kemisk stabilitet og ændrede materialeegenskaber ved ældning. Der er heller ikke megen information om undersøgelser af PE-membraners tilstand, efter at de har været indbygget i en klimaskærm i en tid svarende til en bygnings brugstid.

Ligeledes indeholder litteraturen ikke entydige vurderinger af, hvordan ældning af PE-membraner og tilknyttede komponenter som fx tape kan simuleres og testes.

Litteraturstudiet viste, at PE er den mest producerede plast i verden. Der produceres ca. 80 millioner ton plast årligt, hvoraf næsten 80 % anvendes til plastfolie, herunder membraner. PE anvendes i form af folier i stor udstrækning i mange sektorer, fx byggeriet, landbruget, gartnerier og bilproduktion, men PE anvendes også til emballage, fx bæreposer, flasker, kasser, dunke, rør, slanger, kabelisolering, legetøj osv. PE er fremstillet gennem polymerisation af gastypen ethylen og er blevet produceret siden 1932.

Membraner i byggeriet er blevet anvendt i Danmark fra 1940'erne. Allerede i det første bygningsreglement fra 1961 var der opmærksomhed på fugt i konstruktioner og at forhindre opfugtning af konstruktionerne. I Bygningsreglement 1961, kap. 7, under emnet fugtisolering står der, at alle konstruktioner skal udføres på en sådan måde, at kondensfugt undgås såvel udvendig som indvendig i konstruktionerne.

Inden for byggeri anvendes PE i form af membraner typisk, hvor tilstrækkelig lufttæthed og dampdiffusionsmodstand skal etableres ved at montere en lufttæt dampspærre i klimaskærmen.

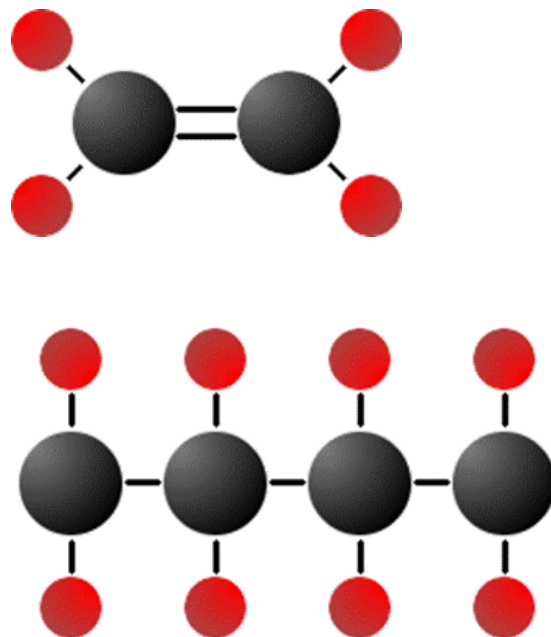
Litteraturstudiet er grundlaget for valget af de materialeegenskaber og den stresspåvirkning, der er fundet relevante at bestemme og tage stilling til for PE-membraner i byggeriet. Stresspåvirkningen afspejler ældning over tid og udgør en accelereret ældningsproces. Prøvninger omfatter både afprøvning af fysiske egenskaber og bestemmelse af kemisk sammensætning og opbygning af PE-membraner. Egenskaber bestemmes både for PE-membraner alene og i kombination med klæber, fx tape eller butylbånd.

Hvad er polyethylen?

Polyethylen (PE) blev syntetiseret ved et uheld i 1932, da forskere ved Imperial Chemical Industries (ICI) undersøgte reaktionen mellem ethylen-gas og forskellige forbindelser ved højt tryk (American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks, 2018). I dag er PE den mest producerede plast i verden. Der produceres ca. 80 millioner ton plast årligt, hvoraf næsten 80 % anvendes til plastfolie. En del plastfolie anvendes som membraner i byggeriet. Ud over folie bruges PE til emballage, bæreposer, flasker, kasser, dunke, rør, slanger, kabelisolering, legetøj osv.

Fremstilling af polyethylen

PE er fremstillet gennem polymerisation af gassen ethylen, se figur 1. Ethylen er en farveløs og brændbar gas, som under et højt tryk (100-300 MPa) og en temperatur mellem 120 og 240 °C omdannes til lange og forgrenede kulstofkæder, Low density polyethylene (LDPE), med en krystalliseringsgrad på 40-50 % (Brydson, 1999). High density polyethylene (HDPE) fremstilles ved lavere tryk (0,1-5 MPa) og temperatur (20-150 °C) end LDPE. Herved opnås en lang og meget lidt forgrenet kulstofkæde med en krystalliseringsgrad på 60-80 % (Brydson, 1999).



Figur 1. Ethylengas med lav molekylarvægt omdannes til formbar polyethylen med høj molekylarvægt efter eksponering for varme og højt tryk.

Når gassen omdannes til PE, ligner den en varm væskemasse. Før den størkner, skubbes massen gennem en plade med små huller. De stive polyethylenstrengene, der kommer ud gennem hullerne, skæres straks i små stykker af en roterende kniv. Resultatet er hvidt, gennemsigtigt granulat, der kan forarbejdes til forskellige produkter.

Additiver er altid nødvendige for at kunne ekstrudere PE, uden at den nedbrydes under processen (Brydson, 1999). Andre additiver bl.a. UV-lys

stabilisatorer kan også forhindre nedbrydning af polymeren under brug i løbet af levetiden. Additiverne tilsættes enten ved selve fremstillingen af PE umiddelbart efter polymeriseringen eller i forbindelse med den endelige forarbejdning (compounding – blanding af polymerer i smeltet tilstand).

Additiver er et centralt element i forarbejdningen af plast til færdige produkter. Nogle additiver tilsættes for at give en smidig forarbejdningsproces og nedsætte risikoen for produktion af emner, der ikke lever op til den ønskede kvalitet. Andre additiver tilsættes for at ændre ved de grundlæggende tekniske egenskaber ved den anvendte polymer. På den måde kan man skræddersy en materialekombination, så den opfylder de tekniske krav, der stilles til det pågældende produkt. Der findes tusindvis af additiver, der kan anvendes alene i forskellige koncentrationer eller i kombination med andre additiver (British Plastics Federation, 2018). Additivernes effekt kan derfor være meget kompleks.

PE som råvare indeholder sædvanligvis små mængder additiv og proceshjælpemidler. PE kan indeholde rester af chrom-, titan-, aluminium-, chlor-, og magnesiumforbindelser, som er katalysatorrester fra polymerisationsprocessen. Det vil være i følgende koncentrationer: Cr < 10 ppm, Ti < 10 ppm, Al < 200 ppm, Cl < 20 ppm og Mg < 10 ppm (Boustead, 2003). Fra producentens side er PE normalt tilsat additiver, der kan lette forarbejdningen. De virker som smøremidler og består typisk af fedtsyresalte. Mest anvendt er calciumstearat, som tilsættes i koncentrationer mindre end 0,2 %. PE er normalt tilsat en standardstabilisator, som er baseret på højmolekylære, sterisk hindrede phenoler. UV-stabilisatorer af HALS-typen (Hindered Amine Light Stabilisers) tilsættes ofte for at hindre nedbrydning.

Antioxidanter

Antioxidanter tilsættes for at modvirke oxidativ nedbrydning af plasten under forarbejdning og/eller for at forlænge produktets levetid. Antioxidanterne kan forlænge levetiden ved at bremse nedbrydning, når produktet påvirkes af varme og lys under brug (Schmidt, 2006). Ved en oxidativ nedbrydning dannes der reaktive frie radikaler, og nedbrydningen kan udvikle sig ved en kædereaktion. Produkterne bliver misfarvede ved oxidativ nedbrydning, og der kan eventuelt dannes revner. Anvendelse af antioxidant er med til at hindre udskillelse af frie radikaler og dermed også muligheden for en kædereaktion (Stivala et al., 1983). Der findes et meget stort udvalg af antioxidant i handelen. De hyppigst forekommende typer med PE hedder monophenoler, bisphenoler, thiobisphenoler og polyphenoler. I PE anvendes de typisk i mængder på 0,05-0,2 %.

UV-stabilisatorer

Ved stuetemperatur oxideres mange plastprodukter specielt på grund af ultraviolet (UV) stråling fra solen. For at modvirke UV-strålingens nedbrydende effekt, der er af størst betydning for polyolefiner, anvendes forskellige typer af stoffer. Følgende UV-stabilisatorer er de mest almindeligt anvendte: Hindrede aminer (HALS (Hindered Amine Light Stabilisers)), benzophenoner (først og fremmest i LDPE), benzotriazoler og metalkomplekser med svovlforbindelser, fx dialkyldithiocarbamat (Tolinski, 2009).

Smøre- og glidemidler

Ved forarbejdning vil den smeltede masse af plast ofte være meget sejtflydende og have tilbøjelighed til at klæbe til værktøjets overflade. En forhøjelse af forarbejdningstemperaturen vil reducere problemet, men giver et andet problem i form af øget termisk nedbrydning. Der tilsættes derfor smøre- eller glidemidler, hvis hovedopgave er at forbedre flydeegenskaberne for den smeltede plast ved at nedsætte adhæsionen mellem plastmateriale og forarbejdningsmaskine eller nedsætte den indre friktion i plastmaterialet. Smøremidlerne inddeles i fire grupper (Kovach, 1970):

- Fedtsyrer, fx stearin-, palmitin-, eruca- og myristinsyre. Stearinsyre anvendes eksempelvis i mængder på 0,1-0,2 % ved kalandrings- (valsning-) og ekstruderingsprocesser.
- Amider og estere af fedtsyrer, fx med glycerin.
- Metalsalte af fedtsyrer, primært i form af aluminium-, calcium-, lithium-, magesium-, natrium- og zinkstearat. De virker som indre smøremiddel i koncentrationer på 0,05-3 %.
- Langkædede hydrocarboner i form af mikrokrySTALLINSKE vokser og paraffinoler eller naturlige vokser som carubavoks og bivoks. Valget af smøremiddel er specifikt for en given kombination af plasttype og forarbejdningsmetode.

Farvestoffer og pigmenter

De fleste plastmaterialer er som udgangspunkt farveløse eller hvidlige, men der er stort set ubegrænsede muligheder for at indfarve plasten. Man kan skelne mellem fire typer farvestoffer (Fleischmann *et al.*, 2015):

- Opløselige farvestoffer, der generelt er aromatiske forbindelser og tilsættes i mængder fra 0,01-2,5 %. Denne type farvestoffer er ikke særlig modstandsdygtige over for kemikalier.
- Organiske pigmenter, der er uopløselige og anvendes i koncentrationer på 0,001-2,5 %, fx alizarinderivater, phthalocyanin, benzidin, kønrøg (carbon black) og metal-azoforbindelser.
- Uorganiske pigmenter, især metaloxider og –salte, der er uopløselige og kemikaliebestandige. Det er fx zinksulfid, zinkoxid, jernoxid, cadmium-manganforbindelser, chrom- og molybdænforbindelser, ultramarin og titandioxid er vigtige eksempler. De uorganiske pigmenter anvendes i koncentrationer på 0,01-10 %.
- Specialfarvestoffer, hvor der fx kan opnås metaleffekt med aluminium- og kobberpulver og perlemorseffekt med blycarbonat eller vismutoxichlorid.

Farvestoffer tilsættes primært som masterbatch, hvor et bestemt blandingsforhold med råplasten giver den ønskede farvenuance.

Brandhæmmere

Alle plastmaterialer er brandbare, men deres antændelighed er meget forskellig. På grund af øgede sikkerhedskrav inden for områder som byggeri, transport og elektriske artikler tilsætter man brandhæmmere til den plast, der anvendes til produkter inden for disse brancher (Paktra & Das, 2011). De mest anvendte brandhæmmere til PE er aluminium- og magnesiumhydroxid. Almindelig PE kan brandhæmmes med chloreret PE (CPE) med et chlorindhold på højst 43 %.

Der finder ikke kommerciel råvarefremstilling (polymerisering) af plastpolymerer sted i Danmark. Færdig polymer importeres derfor og ofte i form af granulat eller pulver, som er klar til anvendelse i produktionen. Hovedparten af de danske plastvirksomheder importerer ufarvet plastgranulat eller -pulver, der fra leverandørens side er tilsat de ønskede additiver bortset fra pigmenter. Ved produktion af farvede produkter tilsætter virksomheden selv pigmenterne og ofte i form af en masterbatch, det vil sige en polymer med en høj koncentration af pigment. Fordelene ved den fremgangsmåde er, at producenten af råvaren ikke er bundet af en standardfarve og ikke behøver at have så stor lagerkapacitet. Når iblanding af masterbatch medregnes til compounding, vurderes det, at mere end 90 % af plastbranchens virksomheder selv compouderer. Antallet af virksomheder, der også tilsætter andre additiver, vurderes ikke at udgøre mere end 10 %. Tilsætning af masterbatch kan foretages umiddelbart i forbindelse med produktionen af emner, idet produktionsapparatet, fx en ekstruder, kan være tilsluttet to doseringsenheder med råvarer (Plastindustrien i Danmark, 2000). Produktion af plastemner er

yderligere beskrevet i publikationer som kan downloades på Plastindustriens hjemmeside (Plastindustrien i Danmark, 2000).

Kontinuerlig compounding/blanding er ofte en ekstruderingsproces, hvor den blandede plastmasse ekstruderes ud i lange strenge, som overskæres til finkornet granulat eller små perlelignende stykker, pellets. Strenge kan eventuelt afkøles inden granulering/pelletering. Herved bliver snitene dog ikke så pæne, men får skarpe kanter og ofte revner. Afkølingen af granulatet sker enten med vand eller luft. Hvis vand anvendes til afkøling i forbindelse med granulering/pelletering, ekstruderes plasten i strenge og afskæres samtidigt under vand, hvori det afkøles. Flowet i vandet transporterer granulatet med, indtil vandet sies fra, og granulatet tørres, inden det lagres (Brydson, 1999).

Folieblæsning

Ved folieblæsning er et folieværkstøj monteret på ekstruderen, så den kan ekstrudere en tyndvægget slange. Normalt ekstruderes slangen, mens den er lodret og peger opad. Slangen føres op til aftræksvalserne, som klemmer slangen flad. På vej fra ekstruderen til aftræksvalserne er det muligt at blæse luft ind i slangen for at udvide den til den ønskede diameter. Aftræksvalsernes hastighed kan indstilles, så man opnår den ønskede folietykkelse. Den udvendige side af den oppustede slange køles af med luft. Når aftræksvalserne er passeret, kan den lodrette plastslange klemmes flad, spoles op og skæres op i den ønskede bredde.

Varianter, egenskaber og anvendelser af polyethylen

PE forekommer i forskellige varianter. Fra meget bøjelige til mere stive typer. De mest udbredte er Low density polyethylene (LDPE) og High density polyethylene (HDPE). LDPE er sejere men mindre stærk end HDPE og bruges bl.a. til membraner, bæreposer og belægning på kartoner, baljer, flasker og kabelisolering. HDPE er meget mere formstabil end LDPE og bruges bl.a. til vand- og afløbsrør, flasker, baljer, spande og legetøj (Peacock, 2000).

Som det fremgår, har densiteten (vægtfylden) stor betydning for de forskellige PE-typers forskellige egenskaber. PE er et kædepolymeriseret materiale. HDPE er polymeriseret, så materialet består af lineære molekylekæder, hvorved den får en højere vægtfylde end LDPE ($0,960 \text{ g cm}^{-3}$ vs $0,925 \text{ g cm}^{-3}$) som er polymeriseret, så den har forgrenede molekylekæder. Det er samme fænomen, man ser, når man fylder havekurven med grenaffald; hvis man skærer alle sideskuddene af de store grene, kan man have langt mere i kurven, som så bliver tungere. Generelt gælder, at jo lavere vægtfylde jo mere blød og fleksibel er polyethylenen. Man kan omvendt sige, at jo højere vægtfylde jo mere robust og stiv er polyethylenen. HDPE anvendes eksempelvis til rør eller kasser, men også til de knitrende, ultratynde indkøbsposer (Peacock, 2000).

PE fremstår som et uklart, let, sejt, fleksibelt materiale og har en glasovergangstemperatur på $-120 \text{ }^\circ\text{C}$. Smeltetemperaturen er ca. $107\text{-}115 \text{ }^\circ\text{C}$ for LDPE og $130\text{-}137 \text{ }^\circ\text{C}$ for HDPE. Maksimal anvendelsestemperatur i luft er $50\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$. PE har fremragende vand- og fugtbestandighed og god bestandighed over for næsten alle opløsningsmidler og andre kemikalier. Generelt besidder PE gode elektriske isoleringsegenskaber.

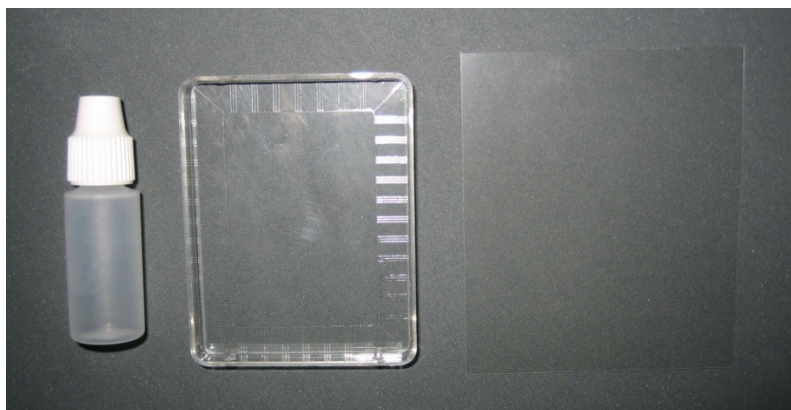
Brugen af PE begrænses af:

- at PE er brandnærende og drypper som et tændt stearinlys, hvis den antændes, se figur 2.
- at de mekaniske egenskaber er stærkt temperaturafhængige.
- at ikke-stabiliseret PE nedbrydes af UV lys.



Figur 2. Polyethylen drypper som stearinlys i kontakt med en flamme (Shashoua, 2008).

PE's optiske egenskaber begrænser også dens anvendelse. Da PE ikke kan blive glasklar, er den ikke velegnet til emballage, der kræver høj gennemsigtighed, fx sodavandsflasker eller blomsterindpakning, se figur 3.



Figur 3. Optiske egenskaber af polyethylen (til venstre) sammenlignet med polystyren (midt) og polyester (til højre). Polyethylen virker mere ugennemsigtig end de to andre plasttyper, fordi dens krystallinitet er højere. Polyester bruges derfor til sodavandsflasker, mens polyetylen bruges til kød- og kosmetikemballage, hvor glasklarhed ikke er prioriteret så højt.

Genanvendelse af polyethylen

Granulat af PE er det basisprodukt, som produkter af PE fremstilles af. Da PE er en termoplast, kan produkter af PE genvindes ved opvarmning til smeltepunktet, formgives og afkøles uden at miste dets oprindelige egenskaber. I dag genbruges ca. 25 % af al plastaffald i Europa (Leblanc, 2017).

Der skelnes mellem produkter af PE produceret af jomfrueligt granulat, 100 % ny granulat og regenerat. Ny eller jomfrueligt PE leveres normalt til industriel produktion i form af granulat. 100 % ny PE er materiale, der ikke tidligere har været anvendt samt afskæringer og restmateriale fra produktionen af jomfrueligt PE. Regenererede produkter bør ikke forveksles med ny PE. I modsætning til ny PE kommer regenereret PE fra forbrugeraffald, dvs. plast, der allerede har gennemgået en komplet 'livscyklus'.

Typer af polyethylen-membraner

PE-folie udgør 60 % af alt plast i form af plastposer, membraner, plastfilm, emballage, presenninger m.m. (Peacock, 2000), hvilket udgør 80 % af den anvendte PE.

LDPE er det mest almindelige materiale til plastmembraner. LDPE anvendes også til folieprodukter, såsom bæreposer, affaldssække og frostemballage. Ofte blandes LDPE med linear low-density polyethylene (LLDPE) (Brydson, 1999).

Som beskrevet i tidligere afsnit er LDPE både et meget fleksibelt, blødt og sejt materiale. Samtidig er det et forholdsvist billigt plastmateriale, som har gode egenskaber i forhold til at modstå påvirkning fra fugt, kemikalier og organiske opløsningsmidler.

LLDPE er den sejeste PE og har en højere brudstyrke end LDPE og er mere transparent. LLDPE anvendes derfor til meget tynde folier bl.a. til landbrugsfolier og bobleplast (Plastindustrien, 2018). LLDPE produceres generelt ved lavere temperaturer og tryk end LDPE.

PE har generelt en relativ lav styrke og stivhed. For at kompensere for disse egenskaber, er det muligt at indlægge armeringsnet af fx polyamidfibre (PA, også kaldet nylon) ved fremstilling af PE-membraner. PA er en stærkere plasttype end PE. PA anvendes udover til tekstiler også til plastprodukter, hvor der er store krav til kemikaliebestandighed og slidstyrke (Plastindustrien, 2018).

Polyethylen-membraner af jomfrueligt materiale

PE-membraner af jomfrueligt materiale er produceret af PE, der ikke er blevet formgivet før. Som beskrevet i tidligere afsnit, tilsættes additiver ved produktionen for at give plasten særlige egenskaber. Det kan være egenskaber, der letter bearbejdningen, eller som giver det færdige produkt en særlig funktionalitet. PE -membranerne kan derudover blive overfladebehandlet med plasma- eller coronabehandling, da de som udgangspunkt har en lav overfladeenergi. Overfladebehandling giver en bedre vedhæftning- og befugtningsevne, hvilket er nødvendigt forud for vedhæftning med tape og print. Overfladebehandlingen sker ved at påvirke overfladestrukturen ved hjælp af udladning af højspænding.

Plasmabehandling rengør og aktiverer PE-membranens overflade før yderligere behandling.

Coronabehandling optimerer vedhæftning- og befugtningsevnen ved at øge membranens overfladespænding (Tantec, 2017).

Polyethylen-membraner af nyt materiale

PE-membraner af nyt materiale er produceret af jomfrueligt materiale, hvori der er blandet PE fra internt produktionsspild og fejlproduktion. Dvs. der tilsættes jomfrueligt plast, der er blevet formgivet, men som ikke er blevet anvendt. Det nye materiale er ofte produceret på samme fabrik, og dets sammensætning er således kendt. I membraner af ny PE vil man således kunne genfinde de blødgøringsmidler, antioxidanter, varme-stabilisatorer og overfladebehandlinger, der blev tilsat under produktionen af jomfruelig PE. Mængden og typen af additiver kan således være ukendt eller variere i membraner og andre materialer af ny PE.

Polyethylen-membraner af regenerat

PE-membraner af regenerat er produceret af granulat fra regenererede produkter. Granulatet er således produceret af indsamlet plast, der har været i anvendelse.

Indsamlet plast adskiller sig på mange måder fra internt produktionsspild, idet den kemiske sammensætning i plast fra den interne produktion kendes, hvorimod den indsamlede plasts indhold ikke kendes i detaljer. Sortering af plast i plastfraktioner er vanskeligt. Uanset om der kildesorteres hos forbrugerne eller udsorteres centralt fra den generelle affaldsstrøm, fandt Luijsterburga & Goossens (2014), at den udsorterede PE-fraktion kun indeholdt 90 % PE. Når film blev udsorteret, indeholdt PE-fraktionen kun 80-85 % PE. Dette betyder, at 10-20 % af massen i den indsamlede PE-fraktion ikke var PE.

PE-membranens morfologi er strukturen i materialet og den ydre form. Den har indflydelse på membranens mekaniske egenskaber. Materialeegenskaberne for PE-membraner af regenerat afhænger således meget af den udsorterede plastblandings sammensætning og den proces, materialerne gennemgår. Derfor er de mekaniske egenskaber af PE iblandet fx PP vanskelige at forudsige (Luijsterburga & Goossens, 2014).

Der findes kun ganske få tilgængelige studier, som sammenligner jomfrueligt PE og regenereret PE. To udvalgte casestudier beskrives herunder.

Casestudier: Regenereret PE

Casestudie: Sammenligning af mekaniske og kemiske egenskaber

I Sampaio et al. (2012) sammenlignes udvalgte mekaniske og kemiske egenskaber for materialer af PE produceret af regenerat, jomfrueligt materiale og kombinationer af disse. Den oxidative induktionstid, OIT, testes. OIT-testen kan anvendes til en kvantitativ vurdering af graden af det testede materials stabilitet. Testen anvendes typisk i forbindelse med kvalitetsstyring.

De to prøver af PE fra regenerat har en OIT-tid på 0-1 minutter ved 190 °C. Det indikerer, at PE fra regenerat ikke er termisk og oxidativt stabiliseret. Prøven af jomfruelige PE viser derimod god stabiliseringsevne og har en OIT-tid på 78 minutter ved 190 °C. Test af kombinationer af jomfrueligt PE og PE fra regenerat viser, at kombinationerne udviser ringere stabiliseringsevne end jomfrueligt PE og bedre stabiliseringsevne end regenereret PE.

Konklusionen på studiet set fra dette projekts perspektiv er, at der forekommer kommercielt tilgængeligt regenereret PE, som ikke er tilsat stabiliseringsadditiver under forarbejdningen. Det vides dog ikke, hvor udbredt det er at untlade stabiliseringsadditiver under forarbejdningen for andre tilgængelige kilder til regenereret PE. I visse tilfælde tilbydes et "opgraderet" produkt, hvor regenerat er compounderet med antioxidanter for at forøge OIT-tiden. Det er ikke angivet, hvorvidt levetiden af produkter støbt af compounderet regenerat også er tilsvarende længere.

En lang række firmaer har specialiseret sig i compounding af plast. Compounding omfatter modellering af en lang række materialeegenskaber samt indfarvning. Firmaer kan imødekomme krav til materialekvalitet i alle tekniske polymertyper og har typisk kompetencer inden for farvenøjagtighed og sikring af, at farven fastholdes kontinuerligt. Det gælder for både ufyldte og fyldte polymertyper med fx flammehæmmere.

Casestudie: Sammenligning af FT-IR spektre og trækmechaniske egenskaber

I Achilias et al. (2007) sammenlignes FT-IR spektre (Fourier transform infrarød (FTIR) spektroskopi) og trækmechaniske egenskaber for regenereret PE og jomfrueligt PE i form af modelpolymerer og affaldsprodukter (emballagefilm, poser, rør) baseret på LDPE, HDPE og PP.

FT-IR er en teknik, der anvendes til at opnå et infrarødt spektrum af absorption eller udledning af et fast stof, væske eller gas. Et FTIR-spektrometer samler samtidig højspektralopløsningsdata over et bredt spektralområde. Dette giver en betydelig fordel i forhold til et dispersivt spektrometer, som måler intensitet over et snævert område af bølglængder over en tid.

Udtrykket Fourier-transform infrarød spektroskopi stammer fra den kendsgerning, at en Fourier-transformation (en matematisk proces) er nødvendig for at omdanne de rå data til det aktuelle spektrum.

Studiet konkluderer for de fire LDPE prøver (dvs. modelpolymer og affaldsprodukter før og efter genbrug), at FT-IR spektrene og målingerne af de trækmechaniske egenskaber for den regenererede PE udviser næsten identiske egenskaber i sammenligningen med den jomfruelige PE. Det samme konkluderes på baggrund af resultaterne for HDPE og PP.

Polyethylen-membraner af lagdelt materiale

PE-membraner af lagdelt materiale er et kompositmateriale bestående af flere lag, fx regenereret PE sammen med et eller imellem to lag ren (jomfruelig eller 100 % ny) PE.

PE-membraner af lagdelt materiale inkluderer også membraner med armeringsnet mellem to lag PE. De anvendes som kraftige presenninger eller ekstra stærke plastmembraner.

Materialeegenskaber for forskellige typer membraner

Undertag

PE-membranens egenskaber har betydning, når membranen anvendes i et undertag. Hvis fx undertaget indgår i et ventileret paralleltag med ventilation under undertaget, kan der både anvendes diffusionsåbne og diffusionstætte PE-membraner. Er der ikke ventileret under undertaget, skal der anvendes en diffusionsåben PE-membran, da der ellers vil kunne samle sig fugt. Diffusionsåbne PE-membraner er dog en sjældenhed. Ud over de fugttekniske egenskaber som vandtæthed og tilstrækkelig vanddampdiffusionsmodstand, skal et undertag også være lufttæt, og der stilles krav til styrken, bestandighed og brandmodstand.

Jo lavere hældning taget har, jo større er risikoen for, at nedbør og kondens ikke bliver ledt væk fra taget. Der stilles derfor større krav til undertaget, hvis taget har en lav hældning. Der skelnes mellem hældning under 25 grader, hældning på 25-35 grader og hældning højere end 35 grader.

Dampspærre

Dampspærren skal forhindre, at fugt i luften trænger fra opvarmede rum ud i den kolde konstruktion. Sker det, vil den relative fugtighed stige, og fugten kan kondensere i isoleringen. PE-membranen spærrer for fugttransporten i form af diffusion og konvektion til de kolde dele af en konstruktion. Diffusion er transport af vanddamp og konvektion er luftstrømning.

Dampspærremembraner af plast eller gummi skal, for lovligt at kunne sælges i den Europæiske Unions medlemsstater, være CE-mærkede, idet der foreligger en harmoniseret produktstandard (Dansk Standard, 2013). Standarden omhandler fleksible membraner til fugtisolering og dampspærre af plast og gummi. Standarden beskriver relevante definitioner og karakteristika.

Det informative bilag A i DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013) giver følgende eksempler på materialer, der kan indgå i fleksible membraner af plast og gummi til fugtisolering:

- CSM chlorosulfonyl polyethylene
- EAA Ethyl/ ethyl acetate
- CSM chlorosulfonyl polyethylene
- PE polyethylene
- PE-C chlorinated polyethylene.

Byggevedirektivet er erstattet af byggeveforordningen. De seks krav vedr. energiøkonomi og varmeisolering, sundhed og sikkerhed mv. i byggevedirektivet går igen i byggeveforordningen, men et syvende grundlæggende krav om bæredygtighed er blevet tilføjet (Europa-Parlamentet, 2011).

Annex ZA i DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013) beskriver, hvilke produkttegenskaber der kan deklarerer for at imødekomme de grundlæggende krav, som byggematerialer skal opfylde ifølge i det tidligere byggevedirektiv:

- Mekanisk modstandsevne og stabilitet
- Sikkerhed i tilfælde af brand
- Hygiejne, helbred og miljø
- Sikkerhed ved anvendelse
- Beskyttelse mod støj.

Normalt er annex ZA i EN-produktstandarder normativt og angiver, hvilke egenskaber som medlemsstaterne kan forlange, at producenterne deklarerer. Annex ZA i DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013) er blot informativt og må derfor ses som et uforpligtende forslag til leverandørerne om, hvad de kan deklarerer i forbindelse med CE-mærkningen. Ved CE-mærkning skal den medfølgende ydeevnedeklaration indeholde *'ydeevnen for mindst én af byggevarens væsentlige egenskaber, der er relevante for den deklarerede tilsigtede anvendelse eller de deklarerede tilsigtede anvendelser'* (Byggeveforordningen, 2011).

Annex ZA i DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013) foreslår, at følgende egenskaber deklarerer:

- Reaktion på brand
- Vandtæthed
- Vanddamppermeabilitet
- Slagmodstandsevne
- Fugestyrke
- Trækstyrke
- Rivstyrke
- Bestandighed
- Indhold af farlige stoffer.

Annex ZA i DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013) indeholder ikke krav til materialeegenskaberne. Kravene skal formuleres nationalt, dvs. i Danmark i bygningsreglementet. Det gældende Bygningsreglement 2018 (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2017) indeholder ikke ordet dampspærre, men ydeevnekrav til bygningen er fx formuleret i:

§ 334

Bygninger skal projekteres, udføres og vedligeholdes, så vand og fugt ikke medfører risiko for personers sundhed eller skader på bygningen.

§ 335

Bygninger skal sikres mod skadelig akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften. Kuldebroer i klimaskærmen må ikke medføre problemer med f.eks. kondensdannelse og skimmelvækst.

§ 336

Bygningskonstruktioner og –materialer må ikke have et fugtindhold, der ved indflytning medfører risiko for vækst af skimmelsvamp.

Med henblik på at gøre valget af dampspærresystem (dampspærremembran og tilbehørsmaterialer i form af fx klæber, tape m.v.) operationelt har DUKO etableret en frivillig mærkningsordning for dampspærresystemer (www.duko.dk).

Ifølge DUKO skal en klæbet dampspærresamling have en vanddampdifusionsmodstand (Z-værdi) $> 50 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$. Efter accelereret ældning må værdien højst reduceres med 50 % (DUKO, 2014). De fleste PE-membraner er tættere end ovenstående krav, og derfor kan det i praksis være vigtigere, at dampspærresystemet (membran og samling) kan samles og slutte tilstrækkeligt lufttæt til de tilstødende bygningskomponenter af fx træ og beton, end at diffusionsmodstanden er meget høj. Det kan derfor være en fordel at anvende en tynd membran, da den er lettere at arbejde med og få til at slutte tæt, fx i hjørner. Tynde membraner vil dog have større risiko for at blive brudt ved gennemlokning under montering. Lufttæthed for dampspærresystemet vurderes ved, at dampspærresystemet monteres i en prøvestand, på en mock-up. Testen foregår ved at måle luftgennemstrømningen ved en lufttryksforskel over dampspærren mellem prøvestandens indvendige volumen og atmosfæren.

Samlinger eller tilslutning af membraner skal udføres med mindst 50 mm overlæg, som klæbes sammen med fx tape, lim eller butylbånd.

Nedenstående egenskaber skal deklareres for membraner i henhold til *Krav til dampspærresystemer under DUKO* (DUKO, 2014):

- Trækstyrke på langs og på tværs
 - Testes jf. DS/EN 13589-1 (Dansk Standard, 2018) og EN 12311-2 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2013)
 - Krav: $> 100 \text{ N}/50\text{mm}$
- Brudforlængelse på langs og på tværs
 - Testes jf. DS/EN 13589-1 (Dansk Standard, 2018) og EN 12311-2 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2013)
 - Krav:
- Rivstyrke på langs og på tværs
 - Testes jf. DS/EN 13589-1 (Dansk Standard, 2018) og EN 12310-1 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 1999)
 - Krav:
- Modstand mod slagpåvirkning
 - Testes jf. EN 12691 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2018)
 - Krav:
- Vanddampdifusionsmodstand (kun for diffusionsåbne materialer).
 - Testes jf. EN 1931 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2000)
 - Krav:
- Vandtæthed
 - Testes jf. EN 1928 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2000)
 - Krav: bestået/ikke bestået
- Alkaliresistens
 - Testes jf. EN 13984 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2013)
 - Krav: bestået/ikke bestået
- Brandklasse
 - Testes jf. EN 13501-1 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2009)
- Peelstyrke
 - Testes jf. EN 12316-2 (Den Europæiske Standardiseringsorganisation, 2013)
 - Krav: $> 10 \text{ N}/50\text{mm}$

Ovenstående krav til dampspærresystemer viser de nødvendige materialeegenskaber iht. den relevante produktstandard, men tager også hensyn til systemets bygbarhed. For at sammenligne forskellige typer PE-membraner

er det desuden relevant at undersøge den kemiske sammensætning og opbygning ved:

- ATR-FTIR spektroskop
- Fladevægt og -tykkelse
- Overfladespænding (ACCU DYNE test)
- Den oxidative induktionstid (OIT).

ATR (Attenuated total reflection) er en prøveudtagningsteknik, der anvendes i forbindelse med infrarød spektroskopi. Teknikken gør det muligt at undersøge prøver direkte i fast eller flydende tilstand uden yderligere forberedelse.

ATR teknikken benytter en egenskab af total intern refleksion, hvilket resulterer i en elektromagnetisk bølge. En stråle af infrarødt lys ledes gennem ATR-krystallet på en sådan måde, at det afspejler mindst en af siderne af den indre overflade i kontakt med prøven. Denne refleksion danner den elektromagnetiske bølge, som strækker sig ind i prøven. Gennemtrængningsdybden i prøven er typisk mellem 0,5 og 2 mikrometer. Den nøjagtige værdi bestemmes af lysets bølgelængde, indfaldsvinklen og brydningsindekserne for ATR-krystallen og materialet, der undersøges. Antallet af refleksioner kan varieres ved at variere indfaldsvinklen. Strålen opsamles derefter af en detektor, når den forlader krystallen. ATR-FTIR er en udvidelse af teknikken anvendt ved ATR, der anvendes til at opnå et infrarødt spektrum af absorption eller udledning af et fast stof, væske eller gas (Fourier-transform infrared spectroscopy). Anvendelsen af ATR-FTIR har betydelig videnskabelige anvendelse.

Denne elektromagnetiske effekt virker kun, hvis krystallen er lavet af et optisk materiale med et højere brydningsindeks end prøven, som undersøges. Analyseres en fast prøve presses prøven til direkte kontakt med krystallen. Det opnåede signal-støjforhold afhænger af antallet af refleksioner, men også af den totale længde af den optiske lysbane, som dæmper intensiteten.

Polyethylen-foliers anvendelse og funktion

Generel anvendelse

Egenskaberne for PE-membraner af regenerat kan afhænge af de genbrugte plasttyper og af affaldsstoffer fra tidligere brug af plasten. PE-folier anvendes inden for forskellige brancher, såsom landbrug, gartneri og byggeri. Herfra kommer også store mængder genbrugsplast (Miljøstyrelsen, 2006).

Inden for gartneri, skovbrug og landbrug anvendes PE-folier bl.a. til jorddækning som alternativ til kemisk ukrudtskontrol. Jorddækning med sort plast forhindrer fremspiring og vækst af ukrudt ved at afskærme for lys. PE-folierne, der anvendes, er ofte UV-stabiliseret med sod indlejret i folien og har en materialetykkelse på 0,8-1,2 mm. PE-folierne bevirker desuden, at temperaturen i jordoverfladen under membranen bliver høj, hvorved jorden "dampsteriliseres" (Miljøstyrelsen 1997). Inden for landbrug og gartneri anvendes PE-folier desuden til forskellige former for folieemballage, bl.a. til fødevarer og halmballer.

I byggeri anvendes PE-folier som folieemballage, dampspærre og undertag. Ubrudte PE-membraner giver lufttæthed og en meget høj dampdiffusionsmodstand, hvilket har stor betydning for funktionen og levetiden af bygningskonstruktioner og energiforbruget i bygninger.

Bygnings-skader forårsaget af fugt kan medføre skimmelvækst, råd og reduktion af klimaskærmens isoleringsevne. Fugtskaderne kan skyldes transport af fugt fra indeklimaet ud i klimaskærmens ydre del, enten i form af diffusion eller konvektion.

Dampspærre monteres stort set alle steder i huset, hvor der ikke er bygningskomponenter, der er tilstrækkeligt luft- og diffusionstætte. I vægge og loft kan dampspærren placeres ind til en tredjedel ind i den isolerede del af bygningens klimaskærm fra den varme side, mens den i terrændækket kan placeres halvt nede i den isolerede del af konstruktionen, fx i et terrændæk. En undertagsmembran bortleder regnvand og fygesne, som er trængt gennem tagdækningen og modvirker, at fugt trænger videre ind i bygningens konstruktion.

Et undertag anvendes under tagbelægningen, hvor der kan trænge mindre nedbørsmængder igennem, fx under tagsten. Undertaget opfanger og leder vandet til tagrenden. Ud over undertagsmembraner, også kaldet banevarer, findes der også pladevarer. Det kan være egnede membraner, herunder PE-membraner, der kan være fastmonteret på fx krydsfiner eller OSB-plader. Undertage anvendes både i tage med ventileret tagrum og paralleltage.

PE-membraner anvendt som dampspærre og undertage kan i en vis udstrækning sorteres ud ved renovering eller nedrivningsaktiviteter, men det må forventes, at der i den udsorterede plast kan være forureninger fra andre byggematerialer og støv.

Undersøgelse af polyethylen-membraners anvendelse i byggeriet

Som beskrevet anvendes PE-membraner flere steder i byggeriet. Studier af holdbarheden af PE-membraner, der anvendes til andre formål i bygningen end dampspærre, kan være med til at belyse, hvordan man kan vurdere holdbarheden af dampspærre af PE. I de følgende afsnit beskrives to væsentlige casestudier.

Casestudier: Polymer-membraner som undertag

Casestudie: Undersøgelse af vandtæthed

Brandt et al. (2008) har undersøgt vandtætheden af syv forskellige typer undertagsmembraner. Resultaterne sammenholdes med undersøgelser af vandtætheden af en olieimprægneret krydsfinersplade og en overfladebehandlet gipsplade. De ni prøver blev testet som undertag i et testhus og blev orienteret henholdsvis mod syd og mod nord. Disse prøver var udsat for vind og vejr i omkring 18 år. Resultaterne af undersøgelseerne er, at en stor del af de undertage, der var kommercielt tilgængelige i 1990'erne, nedbrydes betydeligt under anvendelse, og vandtætheden forringes derved.

Casestudie: Undersøgelse af holdbarhed

Lindfors (1997) har sammenlignet ni typer undertage, heraf to LDPE-membraner. I undersøgelsen blev holdbarhed mod termisk nedbrydning og vand undersøgt. Desuden blev effekten af kombinationer af vand, varme og kulde og naturlig ældning undersøgt. Produkterne viste sig at fungere korrekt, når de blev installeret. Termisk nedbrydning viste sig at være den væsentligste nedbrydningsfaktor for de anvendte LDPE-membraner.

Casestudie: Virgin polyethylen-membran anvendt i 15-års studie

Möller et al. (2001) har beskrevet observationer fra et studie, hvor en jomfruelig LDPE-membran blev anvendt som damp- og luftspærre i en vægkonstruktion i en bygning i Sverige. En LDPE-membran var i et tilfælde monteret, så en del af membranen var i væggen, mens en anden del af membranen stak ind i rummet. Derved har det været muligt at sammenligne den del af PE-membranen, der er ældet inden i vægkonstruktionen med den del, der er ældet inden i rummet ved stuetemperatur. Ældningen er foregået over 15 år.

Möller et al. (2001) har sammenlignet de to LDPE-membraner "i væggen" og "i luften". Med hensyn til brudforlængelse og brudstyrke kunne der ikke detekteres nogen signifikant forskel på prøven taget fra PE-membranen, som var ældet inden i væggen, og prøven taget fra PE-membranen, der var ældet inden i rummet. Desuden blev de to LDPE-prøvers molekylvægtfordeling ved hjælp af størrelseskromatografi målt. Målingen vil potentielt kunne detektere, om polymerkæderne var blevet brudt eller kortere som følge af de forskellige ældningsmiljøer; dog var LDPE-prøverne "i væggen" og "i luften" ikke signifikant forskellige.

Möller et al. udførte desuden målinger af den oxidative induktionstid (OIT) på prøverne og fandt, at "i luften"-prøverne havde en signifikant lavere stabiliseringssevne.

Konklusionen på studiet var dog, at begge prøver, "i væggen" og "i luften", bevarede deres mekaniske egenskaber, og de størrelseskromatografiske målinger viste, at polymerkæderne ikke var blevet nedbrudt nævneværdigt. Den testede dampspærre af jomfruelig LDPE havde efter 15 års ældning bevaret sine egenskaber.

Ældningsmetoder

Ældning af polymerer

Alle materialer ældes eller nedbrydes med tiden og undergår derved ændringer i deres egenskaber. Metaller ældning kaldes ofte korrosion, mineralers ældning for erosion, og for træ kaldes ældning for forrådnelse.

Plastmaterialer undergår også ældning. Egenskaber, der ændres, og hastigheden af ændringerne afhænger af plasttypen og af det miljø, plastmaterialet udsættes for i tid, se figur 4.

Generelt kan plast udsættes for kemisk påvirkning eller fysisk påvirkning. Disse kan resultere i følgende fænomener:

Fysisk proces:

- Adsorption
- Kvældning
- Opløsning
- Udvaskning af additiver
- Spændingsrevnedannelse.

Kemisk proces:

- Kemisk reaktion.

Fysiske processer

Adsorption og efterfølgende kvældning vil generelt medføre en reduktion af materialets styrke og stivhed, men en forbedring i materialets slagstyrke, Karbæk (1993). Processen sker ved kontakt med gas eller væsker. Ved desorption vil de oprindelige egenskaber genskabes, hvilket gør processen reversibel (Van Krevelen, 1990; Wright, 2001).

Når et materiale opløses i et opløsningsmiddel, typisk en væske, omdannes det fra fast form til flydende form. Efter afdampning af opløsningsmidlet fælder det opløste stof (polymeren) ud, og den fast tilstandsform genskabes. Dog vil emnet miste sine oprindelige dimensioner. I materialemæssig sammenhæng er der tale om en reversibel proces. Additiver kan udvaskes fra plastmaterialer ved fx kontakt med kemikalier. Derved reduceres den effekt, som var tiltænkt med additiverne, og derved ændres materialets egenskaber på en irreversibel måde (Van Krevelen, 1990; Wright, 2001).

Spændingsrevnedannelse er en proces, hvor der kan opstå brud eller revner, hvis plastemnet kommer i kontakt med bestemte kemikalier, og plastemnerne indeholder mekaniske spændinger som følge af støbeprocessen (Van Krevelen, 1990; Wright, 2001).

Kemisk proces

De kemiske processer vil ofte resultere i, at de enkelte polymermolekyler undergår blivende, irreversibel, kemisk forandringer. Derved bliver materialet nedbrudt permanent. For dampspærre af PE i bygninger har de kemiske nedbrydningsprocesser derfor større betydning for den samlede levetid end de fysiske nedbrydningsprocesser, hvis dampspærre ikke belastes mekanisk eller placeres udsat i konstruktionen.



Figur 4. Beholdere fremstillet af PE kan nemt absorbere fedt, olier og farvestoffer fra mad. Den egen- skab skyldes, at PE har en åben polymerstruktur, hvor amorf, ustruktureret plads mellem polymerkæ- derne tiltrækker små molekyler, der binder sig fast. Til venstre af billedet ses en ny, ren beholder, og til højre ses en lignende beholder efter 2 år i brug. Containeren til højre har absorberet fedt og olier fra den mad, som har været opbevaret i beholderen (Shashoua, 2008).

Der vil i de følgende afsnit blive taget udgangspunkt i ældningsmetoder, der anses for at være relevante for dampspærrer af PE i byggeriet, og her er ned- brydning- og forandring som følge kemiske forandringer især relevant, idet PE ikke i nævneværdig grad udsættes for de ovenfor nævnte fysiske processer. Dampspærrer kan udsættes for vandpåvirkning, men da PE ikke er opløselig i vand og ikke påvirkes kemisk af vand, vil der i de følgende afsnit blive fokuse- ret på de øvrige kemiske reaktioner, der kan ske ved ældning af PE.

Ældning af polyethylen:

De afgørende ældningsfaktorer for PE er vist i oversigtsform i figur 5.

PE er med hensyn til termisk nedbrydning et forholdsvist stabilt materiale. Ved tilstedeværelse af oxygen sker der dog nedbrydning selv ved lavere temperaturer og i betydelig grad ved højere temperaturer (Kirk, 1998).

Plasttype	Ældningsfaktorer													
	Varme	Oxygen	Metaller	UV-lys	SO ₂ , NO ₂ , O ₂	Energirig stråling	Vand	Syrer	Baser	Oxidationsmidler	Opløsningsmidler	Skimmelsvampe	Bakterier	Termitter
PE	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	(+)	-	+
PP	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	(+)	-	+
PMP	+	+	+				-	-	-	+	-			
PS	+	+		+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-
SB	+	+		+			-	-	-	+	+			
ABS				+			-	-	-	+	+			+
PVC	+	+	+	+	+	+	(+)	-	-	+	+	+	+	+

Figur 5. Ældningsfaktorer for forskellige polymerer, bl.a. polyethylen (PE). Et plus betyder at ældningsfaktoren tillægges afgørende betydning, et plus i parentes betyder, at ældningsfaktoren tillægges begrænset betydning, og et minus angiver, at ældningsfaktoren kan tillægges ringe eller ingen betydning (Karbæk, 1993).

Det er de C-H-bindinger, der optræder i forbindelse med molekylernes forgreningspunkter i polymerkæden, der er mest udsatte for oxidation (Allan, 1992). Dette er forklaringen på, at fx polypropylen oxiderer lettere end PE, fordi polypropylen i molekylkæden kun indeholder et C-H-forgreningspunkt for hvert andet C-atom i hovedkæden.

Graden af krystalinitet er således en parameter, der er af væsentlig betydning for polymerens oxidative nedbrydning (Allan, 1992). Dette skyldes, at graden af krystalinitet har afgørende betydning for diffusionshastigheden af oxygen, og en høj grad af krystalinitet resulterer i en lavere diffusionshastighed for oxygen. Da de fleste dampspærre er lavet af LDPE og dermed har en lav grad af krystalinitet, er LDPE mere udsat for oxidation end fx HDPE. Dette er grunden til, at kommercielt tilgængelig LDPE normalt vil være tilsat stabiliseringsadditiver, der hæmmer nedbrydning ved oxidation. Disse additiver kaldes antioxidant.

PE vil i ustabiliseret tilstand være påvirkelig over for sollys. Visse overgangsmetaller og metalsalte, fx jern, Fe⁺⁺ og Kobolt, Co⁺⁺⁺, medvirker til termisk-oxidativ nedbrydning af PE (Shashoua, 2008; Allan, 1992), se figur 6.



Figur 6. PE-bæreposen eksponeret for sollys og oxygen i 12 måneder er disintegreret, fordi polymerkæden er knækket pga. UV-lysets energi. Posen kan ikke længere anvendes som en pose.

Additiver i dampspærre

Tabel 1 viser typiske additiver, som anvendes i plastmaterialer. De additiver, som anvendes i LDPE til dampspærre, og som har betydning for dampspærrers levetid, er primært antioxidanter og sekundært varmemestabilisatorer. Tilsætning af antioxidanter har til formål at forlænge levetiden, idet de modvirker termisk oxidativ ældning, indtil de er "brugt op". Varmestabilisatorerne virker ved temperaturer over 150 °C, og tilsættes for at antioxidanterne ikke skal blive forbrugt under fremstillingsprocessen (Allan, 1992).

Producenter af PE-membraner tilsætter antioxidanter og varmemestabilisatorer. Mængden af antioxidanter og varmemestabilisatorer reduceres uundgåeligt over tid, idet oxidation af platen i atmosfærisk luft altid sker. Mængden af additiver reduceres således som følge af oxidation. Derfor er det vigtigt, at producenter, der fremstiller PE-membraner til dampspærre af PE-regenerat, gentilsætter antioxidanter og varmemestabilisatorer til platen.

Som beskrevet i tidligere afsnit kan plast og PE tilsættes en lang række hjælpestoffer (additiver) for at opnå en bestemt effekt. I tabel 1 er en række af de vigtigste additiver samlet.

Tabel 1 Oversigt over typiske additiver i plastmaterialer.

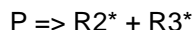
Additiv type	Formål	Bruges i LDPE i dampspærre?	Flygtige eller ej?
Varmestabilisatorer	Forhindrer termisk nedbrydning under fremstillingen	Ja	Ikke flygtig
Antioxidanter	Udsætter nedbrydning/forlænger levetid	Ja	Ikke flygtig
Smøre- og glidemidler	Reducerer friktion mellem platen og procesmaskineriet eller forhindrer membranbaner i at klistre sammen	Ja	Ikke flygtig
Farvestoffer og pigmenter	Bruges til indfarvning. Eksempelvis bruges titandioxid (hvid) som hvidt pigment	Som regel ja	Ikke flygtig
Flammehæmmere	Ved tilsætning af fx fosforsyreester, antimontrioxid og bor-forbindelser hæmmes brandbarheden af platen	Som regel nej	Ikke flygtig
Antistatmidler	Forhindrer elektrostatiske opladning	Kan være tilsat	Ikke flygtig
Blødgøringsmidler	Blødgør plastmaterialer, der i ren form er stive og hårde. Mest kendt er de såkaldte phthalater som blødgør PVC	Nej	Ikke flygtig
Drivmidler	Bruges for opskummede plastemner. Mest kendt er de stoffer der bruges til at opskumme polystyren (EPS), fx pentan eller andre hydrocarboner	Nej	Let flygtig
Fyldstoffer	Kan tilsættes for at reducere prisen, fx kridt, eller for at forøge styrken, fx glasfibre	Som regel nej	Ikke flygtig

Ældningsformer for plast

Termisk oxidativ ældning

Kemiske nedbrydningsreaktioner med oxygen forårsager typisk brud i den molekylære hovedkæde, hvorved polymermolekylvægten falder.

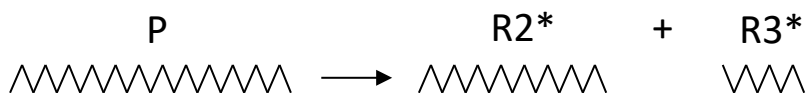
Molekylære kædebrud vil ske i polymerkæden i mellem atomer, hvor bindingsenergien er lavest. For PE vil det typisk ske i C-C-bindingen og vil resultere i dannelsen af to polymerkæder, der hver har et frit radikal i enden:



P er den oprindelige PE-polymerkæde, og R₂ og R₃ er PE-polymerklæder dannet ved brud af P-polymerkæden.

Notationen stjerne, *, angiver, at polymeren er et radikalmolekyle med en uparret elektron. Et radikal, eller en fri radikal, er meget reaktivt og deltager nemt i kemiske reaktioner og har meget kort levetid, typisk under 1 sekund.

Grafisk kan kædebrudsreaktionen vises som:

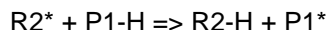


Når kæderne knækker, falder molekylvægten af polymererne, og derved forringes sammenhængskraften i materialet, hvilket kan resultere i lavere mekanisk styrke, hvilket fx kan ses som et fald i brudstyrken og/eller i rivstyrken.

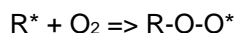
I følgende afsnit bruges følgende forkortelser (Allan, 1992; Van Krevelen, 1990):

R*	Polymerkæde med radikal-terminering
R-H	Polymerkæde termineret med et brint-atom, stabilt
P	Polymerkæde
R-O-O*	Polymerkæde termineret med radikal peroxid-gruppe
R-O-O-H	Polymerkæde termineret med peroxid-gruppe.
*O-H	Hydroxylgruppe, radikal.

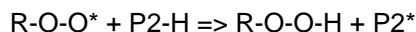
De frie radikaler vil bl.a. reagere med andre polymerer, og der kan ske hydrogenoverførsel:



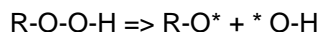
Ved tilstedeværelsen af ilt i plasten vil der dannes peroxider:



Disse peroxider vil reagere med hydrogenatomer:



Den dannede peroxid, R-O-O-H, er et meget ustabilt molekyle, fordi O-O-bindingen er svag og vil bryde let, så der dannes to nye radikaler:

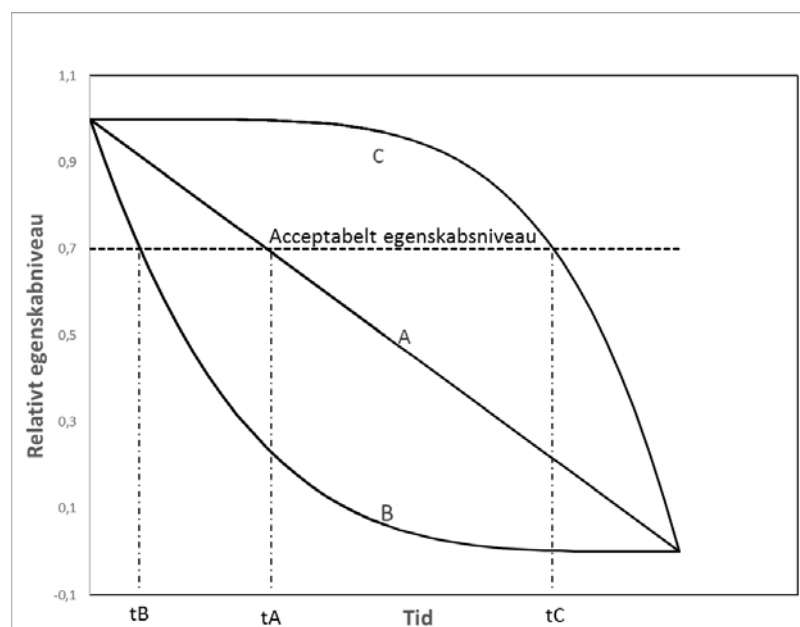


Herved er der nu to nye meget reaktive radikaler, der kan lave nye reaktioner i polymeren.

Accelereret ældning

Ældning af PE sker fra det tidspunkt, PE-emnet bliver formgivet og fortsætter efter afkøling. Da PE-membraner som vind- og dampspærre helst skal holde hele klimaskærmens levetid, er der behov for at accelerere ældningsprocesserne, hvis vind- og dampspærrens levetid skal vurderes inden indbygning. Accelereret ældning udføres ved at stresspåvirke materialerne i en grad, der afspejler det tidsperspektiv, man ønsker at vurdere materialerne i forhold til. Påvirkningen af materialet skal være relevant i forhold til det miljø, hvori materialet befinder sig i hele dets levetid. Stresspåvirkningen har således til hensigt at øge hastigheden, hvormed de relevante nedbrydningsprocesser foregår. Den øgede hastighed for nedbrydning skal derpå sættes i forhold til levetiden af materialet i det miljø, hvor det anvendes.

Ældningen af plast kan følge forskellige forløb, som illustreret i figur 7. Forløb C illustrerer et ældningsforløb, hvor den målte materialeegenskab ikke ændres nævneværdigt i starten af plastemnets levetid for til sidst at blive forringet, så det ved tiden t_C svigter. Forløbet af ældningsprofilen A, B eller C afhænger for PE's vedkommende af, i hvilken grad PE-membranen er tilstrækkeligt stabiliseret med stabiliseringsadditiver, såsom antioxidant, som tilsættes plasten under fremstilling.



Figur 7. Principielt forskellige forløb af relativt egenskabsniveau afhængigt af tiden (Karbæk, 1993).

Accelereret ældning kan foretages på forskellige måder. Valg af metode afhænger af, hvilke atmosfærer og anvendelser, PE-membraner kan risikere at blive udsat for i hele dens levetid. Levetiden omfatter produktion, pakning, distribution, håndtering i distributionsledet, opsætning på byggepladsen frem til byggeriet færdiggøres og anvendelse i bygningen i dennes levetid.

Den mest relevante ældningsmetode for dampspærre af PE i byggeriet er termisk ældning ved forhøjet temperatur med høj og lav relativ luftfugtighed i atmosfærisk luft.

Andre ældningsmetoder kan anvendes for simulering af andre anvendelsesområder. Derfor gennemgås enkelte andre ældningsmetoder, stresspåvirkninger kort. Disse ældningsmetoder kan anvendes for plastmaterialer, men de er mindre relevante for PE-membraner, der anvendes som dampspærre i byggeri.

Kemisk ældning

Denne metode kan anvendes til at teste plastmaterialer, der under anvendelse er i kontakt med kemikalier. Man kan fx neddykke plasten i kemiske væsker ved forhøjet temperaturer for derved at simulere brugsbetingelser og

opnå en accelererende effekt. I standarden for test af dampspærre EN 13984, *Fleksible membraner til fugtisolering - Dampspærre af plast og gummi - Definitioner og karakteristika*, beskrives en prøvningsmetode, hvor dampspærre eksponeres for en opslemning af ulæsket kalk for at accelerere den kemiske ældning (Dansk Standard, 2013). En sådan påvirkning kan være relevant for PE-membraner, som er i kontakt med beton. Ved test og vurdering af PE-membraners modstandsdygtighed er det således relevant at vurdere PE-membranens alkaliresistens.

Fotokemisk accelereret ældning

Denne metode er relevant for plastmaterialer, der under anvendelse er udsat for sollys. Som accelereret ældningsmetode kan man udsætte plasten for naturligt lys ved målestationer placeret langt over havets overflade i bjergområder, hvor solens UV-lys er kraftigere end ved havoverfladen. Som alternativ kan der bruges lys fra kunstige lyskilder frembragt fra fx Xenon-lamper. Idet dampspærre af PE indbygges i en vægkonstruktion, er fotokemisk ældning ikke relevant for dampspærre (Kirk, 1998). Det forudsættes således, at dampspærre af PE håndteres, så de frem til indbygning ikke udsættes for UV-lys.

Accelereret termisk ældning – generelt

Målet med accelereret ældning er at fremskynde nedbrydningsprocesser inden for en passende tidshorizont, dvs. i løbet af ca. en måned i stedet for ca. 20 år. Plastindustrien bruger denne metode for at undersøge levetid af plastprodukter inden for en kort tidsperiode. Ved at eksponere plast for temperaturer højere end stuetemperaturer kan man skabe hurtigere oxidation, end der ellers forekommer under anvendelse af PE-membraner (Kirk, 1998).

Termisk ældning kan anvendes til plastmaterialer, der er i kontakt med luft, og hvor det forventes, at oxidativ nedbrydning er den væsentligste nedbrydningsfaktor.

For et bestemt plastmateriale er den termiske ældning afhængig af temperaturen og mængden af ilt i ældningsatmosfæren. Hvis det antages, at ældningen sker i atmosfærisk luft med 21 % ilt, er der kun temperaturen tilbage som variabelt parameter. Ældningstemperaturen skal holdes under PE-membranernes krystallinske faseovergangstemperatur, idet andre ældningsformer ellers kan forekomme, hvis PE ældes i smeltet tilstand (Karbæk, 1993).

De kemiske reaktioner, der sker ved accelereret ældning, er beskrevet med reaktionsskemaer i overstående afsnit om oxidativ termisk ældning.

Accelereret termisk ældning – valg af ældningstemperaturen

Sammenhængen mellem ældningshastigheden, k , tiden, t , og temperaturen, T , kan generelt beskrives med et Arrhenius hastighedsudtryk (Kamal, 1967):

$$k = A \cdot \exp(E/(RT))$$

hvor

E er aktiveringsenergien

A er den præeksponentielle faktor

R er den universelle gaskonstant

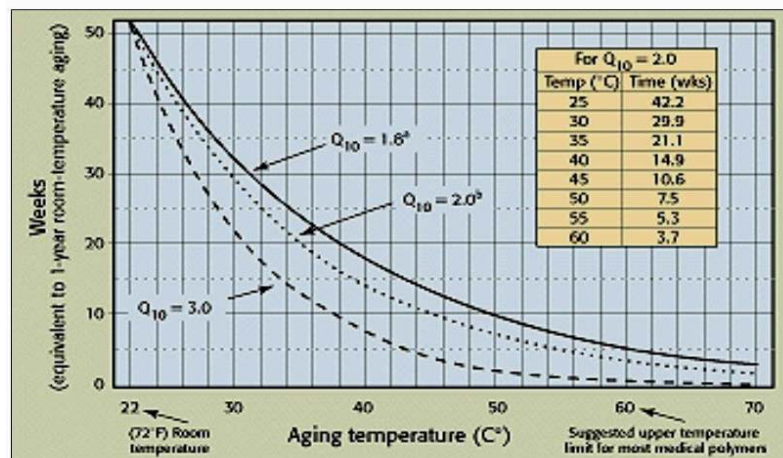
T er temperaturen i Kelvin.

Ældningshastigheden fordobles som tommelfingerregel for hver gang, temperaturen forøges med 10 °C. Holmström og kolleger har undersøgt, hvorvidt denne tommelfingerregel også passer for LDPE, og arbejdet er refereret i Verksnorm 2000 udgivet af Sveriges Plastförbund (Sveriges Plastförbund, 1979).

Hvis der tages udgangspunkt i, at en dampspærre ved anvendelse i det færdige byggeri har en gennemsnitstemperatur på 10 °C, vil en ældningstemperatur på 70 °C svare til: $2^{(60/10)} = 64$ gange hurtigere ældning. 100 dages ældning ved 70 °C svarer altså til 6400 dage, dvs. 17,5 år ved 10 °C. Hvis referencetemperaturen derimod er 15 °C frem for 10°C, svarer 100 dage ved 70 °C derimod kun til ca. 12 år.

Varigheden af ældningen fastsættes ofte som et kompromis, da laboratorie-eksponering er omkostningstung. På europæisk plan er der opnået enighed om, at dampspærre bør ældes i 12 uger (84 døgn) ved 70 °C i henhold til EN 1296. Det fremgår af den harmoniserede standard EN 13984:2013 (Dansk Standard, 2013).

plastics industry uses accelerated ageing and extrapolate to ambient



$Q_{10} = 2$ - rate of **reaction** doubles for every 10°C increase in temperature

Figur 8. Ved accelereret ældning kan plastindustrien måle levetid af plastprodukter i løbet af en måned i stedet for at vente 10-20 år (Woo, 1998).

Anden vurdering af effekten af ældning

Den tyske norm DIN 4108-11 (Deutsches Institut für Normung, 2017) kan anvendes for test og ældning af klæbede samlinger. Af tabel 2 fremgår det, at test af taper udføres efter 120 dages ældning ved 65 °C og 80 % RF. Hvor lang tid, denne påvirkning antages at svare til, fremgår ikke direkte. Ifølge standarden svarer holdbarheden til anvendelsestiden. Denne er i DIBt Leitpapier F, Dauerhaftigkeit und die Bauproduktenrichtlinie (Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, 2005) for normale bygninger 50 år. Det kan derfor antages produktet kan holde i 50 år, hvis det overholder kravene i standarden.

Vurdering af estimeret tid for en given stresspåvirkning er ikke entydig.

Diskussion

PE er den mest producerede plast i verden og fremstilles ved polymerisation af gastypen ethylen. Der produceres ca. 80 millioner ton plast årligt, hvoraf næsten 80 % anvendes til plastfolie. En del plastfolie anvendes som membraner i byggeriet. Ud over folie bruges PE til emballage, bæreposer, flasker, kasser, dunke, rør, slanger, kabelisolering, legetøj osv.

Anvendelse af membraner i byggeriet har været kendt i Danmark fra 1940'erne. Allerede i det første bygningsreglement fra 1961 var der opmærksomhed på fugt i konstruktioner og på at forhindre opfugtning af konstruktionerne. I Bygningsreglement 1961 (Boligministeriet, 1961), kap. 7. *Fugtisolering* anføres det, at alle konstruktioner skal udføres på en sådan måde, at kondensfugt undgås såvel udvendig som indvendig i konstruktionerne.

Membraner af forskellige materialer har været anvendt frem til nyere tid. I dag må PE anses for at være det mest anvendte materiale til membraner, der kan sikre tilstrækkelig damp- og lufttæthed. PE-membranerne anvendes primært i lette konstruktioner (Rasmussen & Nicolajsen, 2007), men også som fugtspærre under trægulve i terrændæk. PE-membraner kan desuden anvendes om en del af et membransystem til radonsikring i konstruktioner mod jord (Rasmussen, 2015, 2016) og som undertage i tagkonstruktioner.

I byggeri anvendes dampspærre af PE typisk, hvor den skal sikre tilstrækkelig lufttæthed og dampdiffusionsmodstand i klimaskærmen. Øgede isoleringskrav og øgede krav til bygningers energieffektivitet har øget opmærksomheden på materialernes egenskaber og holdbarhed. Det gælder både for selve membranen, men også for samlinger i membranen, og på hvorledes membranen samles og tilsluttes til andre bygningskomponenter, fx vinduer, døre og tunge bagvægge med tape og klæber (Rasmussen & Buch-Hansen, 2018).

PE-folier anvendes ligeledes i stor udstrækning i mange andre sektorer som landbrug, gartnerier, bilproduktion og til alle former for emballage.

I dag er der stor opmærksomhed på miljøet, såvel arbejdsmiljøet som påvirkningen af brugerne. Fokus på miljøet omfatter blandt andet genbrug af ressourcer, fx genvinding af plast. Genbrug er en rigtig god idé, men det kan være problematisk, hvis ydeevnen og dermed levetiden af fx PE-membraner forringes og bliver kortere end levetiden for de konstruktioner, som PE-membranerne bygges ind i. Placeringen af PE-membraner i isoleringen i klimaskærmen tillader ikke, med økonomisk rimelighed, at de udskiftes i forbindelse med almindelig vedligeholdelse. Derfor er det rimeligt at forudsætte en lang levetid svarende til klimaskærmens levetid. Svigt i dampspærresystemet kan resultere i store og dyre indgreb i bygningen. Ved et svigt opstår der risiko for, at der kommer råd, svamp og dårligt indeklima i bygningen. Samtidig kan man forvente, at bygningens energiforbrug stiger pga. den manglende lufttæthed.

Litteraturstudiet, som denne rapport redegør for, indeholder kendt viden om PE-membraner anvendt i byggeriet. Viden om de typer PE-membraner, der anvendes i dampspærresystemer i Danmark, er indsamlet gennem fagfællebedømt litteratur og lærebøger. Det er sket ved at søge i databaser, der er almindeligt anvendt af danske universiteter. Der er søgt i litteratur, der dækker dampspærresystemer med PE-membraner og tilsvarende relevante anvendelser af PE materialer, der er produceret af jomfrueligt PE, ny PE, regenereret PE eller en kombination heraf. PE-membraner, som er baseret på en kombination af ren PE og regenereret PE består typisk af et bærelag af

regenereret PE med en tynd overflade af jomfruelig eller ny PE på den ene side eller på begge sider.

Materialet PE forekommer i flere varianter afhængig af produktionstemperatur og -tryk. Der findes Low density polyethylene (LDPE) med en krystalliseringsgrad på 40-50 % (Brydson, 1999). High density polyethylene (HDPE) fremstilles ved lavere tryk og temperatur end LDPE og har lange og meget lidt forgrenede kulstofkæder med en krystalliseringsgrad på 60-80 % (Brydson, 1999). LDPE er det mest almindelige materiale til plastmembraner og anvendes også til folieprodukter, såsom bæreposer, affaldssække og halm-balleemballage. Ofte blandes LDPE med linear low-density polyethylene (LLDPE) (Brydson, 1999).

Ved bearbejdningen af PE er tilsætningen af additiver nødvendig for at kunne ekstrudere PE, uden at den nedbrydes under processen (Brydson, 1999). Additiver tilsættes også for at forhindre nedbrydning af polymeren med tiden. Additiverne tilsættes enten ved selve fremstillingen af PE umiddelbart efter polymeriseringen eller i forbindelse med den endelige forarbejdning. Additiver er et centralt element i forarbejdningen af plast til færdige produkter. Additiver muliggør en smidig forarbejdningsproces og nedsætter risikoen for produktion af emner, der ikke lever op til den ønskede kvalitet. Desuden tilfører additiver grundlæggende tekniske egenskaber til det færdige produkt (British Plastics Federation, 2018). Additiver kan modvirke oxidation, bremse nedbrydning fra påvirkning af lys og varme, modvirke nedbrydning fra UV-stråling, sænke forarbejdningstemperaturen, give farve, virke brandhæmmende og muliggøre folieekstrudering.

Foruden tilsætning af additiver er det muligt ved fremstilling af PE-membraner at indlægge armeringsnet af fx polyamid (nylon) fibre for herved at kompensere for den relativt lave styrke og stivhed, PE generelt har.

Med tiden ændrer PE egenskaber som et resultat af kemiske processer og af fysiske processer som adsorption, kvældning, opløsning, udvaskning af additiver og spændingsrevnedannelse.

De kemiske processer vil ofte resultere i, at de enkelte polymermolekyler undergår blivende forandringer. Derved bliver materialet nedbrudt permanent.

De fysiske processer adsorption og kvældning medfører en reduktion af materialets styrke og stivhed, men en forbedring af materialets slagstyrke, Karbæk (1993). Processen sker ved kontakt med gas eller væsker, og materialet mister sin oprindelige dimensioner. Additiver kan ligeledes udvaskes fra PE materialer ved fx kontakt med kemikalier. Derved reduceres den effekt, som var tiltænkt med additiverne, og materialets egenskaber ændres (Van Krevelen, 1990; Wright, 2001).

Spændingsrevnedannelse er en proces, hvor der kan opstå brud eller revner, hvis materialet kommer i kontakt med bestemte kemikalier, og hvis der er iboende mekaniske spændinger som følge af støbeprocessen (Van Krevelen, 1990; Wright, 2001).

Ældning af PE sker fra det tidspunkt, PE-emnet bliver formgivet, og fortsætter efter afkøling og i brugsfasen. Der er derfor behov for at kende ydeevne over tid bedre for dampspærre af PE, end der i dag kan findes grundlag for i litteraturen. Ved at stresse materialerne kan ældning af materialet fremskyndes og vurderes. Ved en stresspåvirkning er det vigtigt, at påvirkningen afspejler de påvirkninger, materialet udsættes for i den forventede levetid. Stresspåvirkningen, der afspejler ældning, kaldes også for en accelereret ældningsproces.

Ældningen af PE-membraner, der anvendes som dampspærre, kan følge forskellige ældningsforløb. Generelt ændres den målte materialeegenskab ikke nævneværdigt i begyndelsen af plastemnets levetid, men med tiden og til sidst forringes materialeegenskaben så meget, at emnet svigter. Forløbet af ældningsprocessen afhænger for PE's vedkommende af, i hvilken grad

materialet er tilstrækkeligt stabiliseret med additiver. Den valgte stresspåvirkning af materialet til at simulere ældning er derfor vigtig for at kunne vurdere resultatet af ældningen og vurdere levetiden.

I forhold til anvendelse af PE til luft- og dampspærre i byggeriet er den mest relevante ældningsmetode termisk ældning ved forhøjet temperatur med høj og lav relativ fugtighed i atmosfærisk luft. Andre typer ældning kan indebære kontakt med kemikalier eller fotokemiske påvirkninger.

På baggrund af litteraturstudiet og den manglende uvildige dokumentation af egenskaberne for PE-membraner i byggeriet er der sammensat et prøvningsprogram. Prøvningsprogrammet skal tilvejebringe viden om PE-membraners materialeegenskaber, og hvordan de ændrer sig over tid. Det sker ved tests af materialeegenskaber og et ældningsforløb, hvor PE-membraner stresspåvirkes for at simulere ældning over en tidsperiode, der svarer til hvad standarder og andre retningslinjer finder relevant i forhold til et byggeris levetid. Prøvningerne skal give informationer om forskellige PE-membraners levetid, og hvad der har indflydelse på levetiden.

Den accelererede ældningsproces og tests af materialeegenskaber sker ved kontrolleret prøvning i laboratorie. Tests af materialeegenskaber omfatter både tests af PE-membranernes fysiske egenskaber og kemiske sammensætning. Egenskaber bestemmes både for PE-membranerne alene og i kombination med klæber, fx tape eller butylbånd. Prøvningerne foregår lige efter indkøb af membranerne og efter accelereret ældning.

Stresspåvirkningen til illustrering af ældning:

PE folier og samlinger opbevares i tre måneder ved 70 °C og 90 % RH efterfulgt af tre måneder ved 70 °C og 5 % RH i atmosfærisk luft.

Materialeegenskaber bestemmes ved følgende test af materialer:

Bestemmelse af kemisk sammensætning af PE-membraner:

- Attenuated Total Reflektion-Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) spektroskopi som kan vise alle kemiske bindinger, både i organiske og uorganiske materialer, dvs. polymerer og tilsætningsstoffer.
- Acid-Detection indikator strips som kan vise afgasning af syre fra materialer ved at skifte farve i løbet af 24 timer.
- Beilstein test som tydeligt kan vise, om PVC er til stede eller ej. Det kræver, at man brænder et stykke af materialet på en kobbertråd.
- Røntgen florisens analyse der kan vise grundstoffer i materialet.

Bestemmelse af fysiske egenskaber for PE membraner:

- OIT-test som kan anvendes til at vurdere graden af materialets stabilitet. Testen anvendes typisk i forbindelse med en kvalitetsstyringsforanstaltning.
- Trækstyrke på langs og på tværs samt brudforlængelse (arbejdskurve ved trækprøvning). Testen udføres deformationsstyret.
- Rivestyrke på langs og på tværs. Testen udføres deformationsstyret.
- Modstand mod slagpåvirkning (gennemlogning).
- Fladevægt, tykkelse.
- Vanddampdiffusionsmodstand.
- Alkaliresistens og test af overfladespænding (plasma og corona behandling).
- Klæbestyrke på begge sider af membranen. Kombinationer af membran, tape og butylbånd testes.

Litteratur

Achilias, D.S. et al. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536-542.

Allen, N. S., & Edge, M. (1992). *Fundamentals of Polymer Degradation and Stabilization*. Elsevier Applied Science - London and New York.

American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. (2018). *Polypropylene and High-density Polyethylene*. Lokaliseret september 2018 på: <http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatschemistry/landmarks/polypropylene.html>

Boligministeriet (1961). Bygningsreglement for købstæderne og landet. København.

Boustead, I. (2003). *Eco-profiles of the European plastics industry*. Polyolefins. A report for APME, Brussels, July.

Brandt, E., & Hansen, E.J.P. (2008). Durability of roof underlays exposed to long time exposure under in-use conditions. *XIII INT. Conference on Durability of building materials*. Abstract No. 61.

British Plastics Federation. (2018). *Plastics Additives*. Lokaliseret september 2018 på: <http://www.bpf.co.uk/plastipedia/additives/Default.aspx>

Brydson, J.A. (1999). *Plastics Materials* (6th edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Dansk Standard. (2018). *Bitumen og bituminøse bindemidler – Bestemmelse af modifieret bitumens trækegenskaber ved hjælp af force ductility*. DS/EN 13589-1. København: Dansk Standard.

Dansk Standard. (2013). *Fleksible membraner til fugtisolering - Dampspærre af plast og gummi - Definitioner og karakteristika*. DS/EN 13984:2013. København: Dansk Standard.

de Oliveira Sampaio, M.M.B., & Pimentel Real, L.E. (2012). Polyethylene Blends: Better Formulations for Recycled Polyethylene. *Macromolecular Symposia*, 321-322(1), 208-211.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2018). *Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of resistance to impact*. EN 12691. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2013). *Flexible sheets for waterproofing – Determination of tensile properties – Part 2: Plastic and rubber sheets for roof waterproofing*. EN 12311-2. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2013). EN 13984. *Flexible sheets for waterproofing – Plastic and rubber vapour control layers – Definitions and characteristics*. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2013). *Flexible sheets for waterproofing – Determination of peel resistance of joints – Part 2: Plastic and rubber sheets for roof waterproofing*. EN 12316-2. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2009). *Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*. EN 13501-1. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Packaging – Requirements for the use of European Standards in the field of packaging and packaging waste*. EN 13427:2004. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Packaging – Requirements specific to manufacturing and composition – Prevention by source reduction*. EN 13428:2004. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Packaging – Reuse*. EN 13429:2004. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Packaging – Requirements for packaging recoverable by material recycling*. EN 13430:2004. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Packaging – Requirements for packaging recoverable in the form of energy recovery, including specification of minimum inferior calorific value*. EN 13431:2004. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2004). *Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging*. EN 13432:2000. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2000). *Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of water vapour transmission properties*. EN 1931. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (2000). *Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of watertightness*. EN 1928. Bryssel. Belgien.

Den Europæiske Standardiseringsorganisation. (1999). *Flexible sheets for waterproofing – Part 1: Bitumen sheets for roof waterproofing – Determination of resistance to tearing (nail shank)*. EN 12310-1. Bryssel. Belgien.

Deutsches Institut für Normung. (2017). *Thermal insulation and energy economy in buildings - Part 11: Minimum requirements to the durability of bond strength with adhesive tapes and adhesive masses for the establishment of airtight layers*. DIN 4108-11. Berlin. Tyskland.

DUKO. (2009). *Krav til undertagsmaterialer under DUKO* (6. udgave). København: DUKO.

DUKO. (2014). *Krav til dampspærresystemer under DUKO* (1. udgave). København: DUKO.

Europa-Kommissionen. (2018). *EU action plan for the Circular Economy*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European economic and social committee of the regions. Brussels: Europa-Kommissionen. Lokaliseret november 2018 på: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm

Europa-Kommissionen. (1994). *DIRECTIVE 94/62/EC ON PACKAGING AND PACKAGING WASTE*: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council. Brussels: Europa-Kommissionen. Lokaliseret november 2018 på: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31994L0062&from=EN>

Europa-Kommissionen. (2001). *DIRECTIVE 94/62/EC ON PACKAGING AND PACKAGING WASTE: Consultation paper on proposed Directive targets from 2006*. Brussels: Europa-Kommissionen.

Europa-Kommissionen. (2018). *Plastaffald: en europæisk strategi til at værne om planeten, beskytte borgerne og styrke industrien*. Strasbourg: Europa-Kommissionen. Lokaliseret på: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-5_da.htm

Europa-Parlamentet. (2011). *EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS FORORDNING (EU) Nr. 305/2011 af 9. marts 2011 om fastlæggelse af harmoniserede betingelser for markedsføring af byggevarer og om ophævelse af Rådets direktiv 89/106/EØF*. Lokaliseret september 2018 på: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=celex%3A32011R0305>

Europa-Parlamentets og Rådets for den Europæiske Union. (2015). (EU) 2015/720 af 29. april 2015 om ændring af direktiv 94/62/EF med henblik på at mindske forbruget af letvægtsplastbæreposer. Lokaliseret oktober 2018 på: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2015.115.01.0011.01.DAN

European Commission. (2018). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. Brussels: European Commission.

Fleischmann, C., Lievenbrück, M., & Ritter, H. (2015). Polymers and Dyes: Developments and Applications. *Polymers* 2015, 7(4), 717-746.

Fried, J.R. (1995). *Polymer Science and Technology* (3rd Edition). US: Pearson Education.

Kamal, M.R. (1967). Weatherability of Plastic Materials. *Applied Polymer Symposia, Interscience*, New York.

Karbæk, K. (1993). *Plast, Ældning og levetidsbestemmelse* (Kursus P2). Lyngby: Danmark Ingeniørakademi.

Kirk, R.E., & Othmer, D.F. (1998). *Encyclopedia of Chemical Technology* (Volume 10, 5th Edition). New York: Wiley-Interscience. Leblanc, R. (2017). *Plastic Recycling Facts and Figures*. Lokaliseret maj 2018 på: <https://www.thebalancesmb.com/plastic-recycling-facts-and-figures-2877886>

Kovach, G. (1970). *Release Agents. Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (12). 57-65. New York: John Wiley & Sons.

Lindfors, T., & Björk, F. (1997). Performance of modern products for underlay in residential buildings. *Construction and Building Materials*, 11(2), 109-118.

Luijsterburg, B., & Goossens, H. (2014). Assessment of plastic packaging waste: Material origin. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 88-97.

Miljø- og Fødevareministeriet. (1997). *Bekendtgørelse om visse krav til emballager*. Bekendtgørelse nr 298 af 30/04/1997. København. Miljø- og Fødevareministeriet

Miljøstyrelsen. (1997). *Jorddækning som alternativ til kemisk ukrudtskontrol* (Miljøprojekt nr. 359). København: Miljø- og Energiministeriet.

Miljøstyrelsen. (2006). *Miljø- og sundhedsforhold for plastmaterialer* (Miljøprojekt nr. 1103). Lokaliseret maj 2018 på: <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2006/87-7052-135-2/html/default.htm>

Möller, K., Gevert, T., & Holmström, A. (2001). Examination of a low density polyethylene (LDPE) film after 15 years of service as an air and water vapour barrier. *Polymer Degradation and Stability*, 73(1), 69-74. Paktra, P.K., & Das, C.K. (2011). The Shrinkability and Flame Retardancy of Polyolefins and Chlorinated Polyethylene (CM) Blends. *Journal of Polymer Engineering*, 17(3), 231-244.

- Peacock, A.J. (2000). *Handbook of Polyethylene. Structures, properties and applications*. New York: Marcel Decker Inc.
- Plastics Europe. (2017). *Plastics – the Facts 2017*. Brussels: Plastics Europe. Lokaliseret september 2018 på: http://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
- Plastindustrien. (u.å). *Polyamid (nylon), PA-plast*. Lokaliseret februar 2018 på: [https://plast.dk/det-sto-\(2018\)re-plastleksikon/polyamid-nylon-pa/](https://plast.dk/det-sto-(2018)re-plastleksikon/polyamid-nylon-pa/)
- Plastindustrien. (2018). *LLDPE-plast (Linear Low Density Polyethylen)*. Lokaliseret juli 2018 på: <https://plast.dk/det-store-plastleksikon/ldpe-plast-linear-low-density-polyethylen/>
- Plastindustrien i Danmark (2000). *Renere teknologi i plastindustrien. Sprøjtestøbning, ekstrudering, folieblæsning, termoformning og ekspandering af polystyren*. Kan downloades fra Plastindustriens hjemmeside. Lokaliseret november 2018 på: <http://www.plastic.dk/billeder/Publikationer/TERMO-juli2000.pdf>
- Rasmussen, T.V. & Buch-Hansen, T.C. (2018). *Egnede membransystemer til radonsikring: vurdering af ti membransystemer*. 1. udgave udg. København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Rasmussen, T.V. (2016). *Radonsikring af eksisterende bygninger*. 2. udgave udg. København: SBI Forlag.
- Rasmussen, T.V. (2015). *Radonsikring af nye bygninger*. 2. udg. København: SBI forlag.
- Rasmussen, T.V. & Nicolajsen, A. (2007). *Klimaskærmens lufttæthed*. Hørsholm: SBI forlag.
- Schmidt, A. (2006). Miljø- og sundhedsforhold for plastmaterialer (Miljøprojekt Nr. 1103). Miljøstyrelsen. Lokaliseret september 2018 på: <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2006/87-7052-135-2/pdf/87-7052-136-0.pdf>
- Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik. (2005). DIBt Leitpapier F, *Dauerhaftigkeit und die Bauproduktenrichtlinie*. Berlin. Tyskland.
- Shashoua, Y.R. (2008). *Conservation of Plastics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Stivala, S.S., Kimura, J., & Gabbay, S.M. (1983). I: Allen, N.S., *Degradation and Stabilization of Polyolefins* (pp. 111). London: Applied Science Publishers.
- Sveriges Plastförbund. (1979). *Plastfilmer avsedda för montering i byggnader som luft- och ångspärrar: kvalitetsfordringar och provningsmetoder (SPF verksnorm 2000)*. Sverige: Sveriges Plastförbund.
- Tantec. (2017). *Overfladebehandling med Plasmabehandling eller Coronabehandling*. Lokaliseret august 2018 på: <https://www.plasmabehandling.dk/overfladebehandling/>
- Teknologisk Institut. (2006). *Emballagedirektivet. Vejledning til virksomheder* (Miljøprojekt Nr. 1091). Taastrup: Teknologisk Institut.
- Tolinski, M. (2009). *Additives for polyolefins. Getting the Most out of Polypropylene, Polyethylene and TPO*. London: Elsevier.
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2017). *Bekendtgørelse om bygningsreglement 2018 (BR18)*. København: Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. Lokaliseret på: <http://bygningsreglementet.dk/>

Van Krevelen, D.W. (1990). *Properties of Polymers, Chemical Structure. Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions* (3th Edition). Elsevier.

Videncenter for Håndtering og Genanvendelse af Byggeaffald. (u.å.). *Affaldshierakiet*. Lokaliseret januar 2018 på: <http://vhgb.dk/byggeaffald/affaldshierakiet/>

Woo, L., & Cheung, W. (1988). Importance of Physical Aging on Medical Device Design. *Society of Plastics Engineers, Technical Papers*. Society of Plastics Engineers. Annual Technical Conference. Volume 46. p 1352-1355.

Wright, D.C. (2001). *Failure of Plastics and Rubber Products. Causes, Effects and Case Studies Involving Degradation*. Storbritannien: Rapra Technology.

English summary

This is the first report in a series resulting from the project 'The lifetime of polyethylene (PE) barrier membranes in Danish buildings'. The report comprises the literature survey that laid the foundation for the investigation into polyethylene barrier materials.

Polyethylene is polymerized from the gas ethylene and was first developed in 1932. Literature suggests that PE is the most produced plastic on a global level today. Approximately 80 million tons are produced annually of which 80% are used to manufacture films, membranes and sheets. These products are employed in agriculture, horticulture, the automobile industry, food and other packaging, tubing, electrical cable insulation, toys and, the application of greatest relevance to the current study, barrier membranes in building constructions.

Barrier membranes have been used by the Danish building industry from the 1950s. The challenge posed by moisture to building constructions was recognized in the first building regulations dating from 1961 where it can be read that all buildings must be constructed so that the formation of condensation on the external- and internal walls is avoided. PE is typically used as a barrier material to prevent the movement of air and moisture through the building envelope.

This literature survey focuses on polyethylene used as air- and moisture barriers by the building industry and was sourced from databases accessible to Danish universities and research institutions, peer-reviewed literature and textbooks. Its purpose is to give an overview of the various types of PE membranes commercially available as moisture- barrier membranes in use historically and to date. PE barrier membranes may be produced from virgin granules or pellets, 100% unused granules or a mixture of unused and re-grind. This report discusses the synthesis, chemical and physical properties and changes in these with time for PE used as moisture barriers by the building industry in a Danish climate.

It was clear from the literature survey that while a considerable quantity of information was available describing the synthesis, production and chemical and physical properties of PE barrier membranes, very little has been published concerning the long-term performance, chemical and physical stability of membranes after installation and with time. The majority of studies that addressed the long-term performance and stability of PE used higher temperatures and pressures than those relevant to the Danish climate. Of these, few described the correlation between accelerated ageing conditions to real time or the effect of ageing on accessories used to mount and secure PE barrier membranes such as adhesive tapes.

As stated in the opening paragraph, this literature survey was used to lay the foundation for the strategy developed to investigate the selected PE barrier materials. The identification techniques for materials present in barrier membrane, accelerated ageing regimen, analytical methods to determine changes in physical and chemical properties induced by accelerated ageing were selected from published sources. In addition to evaluating PE barrier membranes in isolation, their stability when combined with the adhesive tapes and butyl strips used to mount them was also investigated.

Denne publikation beskriver eksisterende viden om polyethylen (PE) og i særdeleshed PE-membraner, der anvendes som luft- og dampspærre i byggeriet. Membranerne kan være fremstillet af ren PE, regenereret PE eller en kombination heraf.

Beskrivelsen af PE-membraner omfatter bl.a. produktenskaber, kemisk sammensætning og ændrede materialeegenskaber ved ældning. Der er lagt vægt på litteratur om PE-membraner anvendt i byggeri i et klima, der er sammenligneligt med det danske. Litteraturstudiet danner grundlag for et testprogram til vurdering af PE-membraners levetid i byggeriet.

1. udgave, 2018

ISBN 978-87-563-1900-3

