

ELFOR – dansk eldistribution PSO 2002 – F&U

Energieffektiv intern materialetransport i industri Slutrapport

Projektnr. 334-32

April 2005

Udarbejdet af:

*Energy Consulting Network ApS
Teknologisk Institut
Beesche Consult ApS
Dansk Energi Analyse A/S*

Indholdsfortegnelse

1	INDLEDNING.....	3
1.1	MATERIALETRANSPORT	3
1.2	PNEUMATISKE TRANSPORTFORMER	3
1.3	ENERGIFORHOLD.....	4
2	MATERIALETRANSPORT I DANMARK.....	5
3	POTENTIELLE ENERGIBESPARELSER.....	6
4	EFTERVISNING AF BESPARELSESPOTENTIALE.....	7
4.1	DILUTE PHASE.....	7
4.2	DENSE PHASE	7
4.3	ØKONOMISK GEVINST	8
5	OVERVEJELSER VED VALG AF TRANSPORTANLÆG	10
6	MODELLERING OG BEREGNINGSVÆRKTØJ	13
6.1	MODELLERING	13
6.2	BEREGNINGSPROGRAM	14
6.3	KALIBRERING AF PROGRAM	14
7	DENSE PHASE CALC.....	16
7.1	MATERIALEDATA OG ANDRE BASALE PARAMETRE	16
7.2	ANVENDELIGHED OG ENERGIØKONOMI	16
7.3	ANBEFALINGER TIL FORBEDRINGER	17
8	BILAG 1: MANUAL TIL BRUG AF PROGRAMMET DENSEPHASECALC.....	20

1 Indledning

Som et led i projektet ”Energieffektiv intern materialetransport i industrien”, der gennemføres med økonomisk støtte fra ELFORs PSO-midler beskriver denne rapport det endelige resultat af arbejdet med at kortlægge, teste, modellere og programmere energiforbruget ved dense-phase pneumatisk materiale transport.

1.1 Materialetransport

Intern materialetransport i forbindelse med fabrikation er et stort område der i tidens løb har gennemgået en del forandringer. Det har udviklet sig fra ren manuel transport til mekanisk og pneumatisk transport. Valg af teknik er i nogen grad afhængig af det materiales beskaffenhed, som skal transporteres og af pladsforhold.

Man anvender også i dag mekanisk transport af pulvere og granulater. Disse transportapparater er fortrinsvis monteret horisontalt og vertikalt og er snegle, vibrationsrender, transportbånd samt kopelevatorer. Transportapparaterne har, for pulveres vedkommende, ulemper med hensyn til forurening af miljøet i fabrikken. De er desuden meget lidt fleksible at montere, da de kun forløber i rette linier og skal aflevere til næste streng lodret nedad. Endelig vil der være en del vedligeholdelse knyttet til dem.

Hvis man ser på den interne transport af materialer, som enten er pulvere eller granulater, har udviklingen bevirket at man i stadig højere grad anvender den pneumatiske transportmetode. Håndtering af disse materialer er en teknologi for sig, da det kan være vanskeligt og dyrt at håndtere dem, hvis man anvender et forkert princip. Ved pneumatisk transport udnyttes den kendsgerning at de fleste pulvere vil opføre sig som en væske hvis de fluidiseres. Pulvere og granulater vil desuden kunne holde sig frit svævende i en luftstrøm i et rør, hvis hastigheden er tilstrækkelig høj, men materialet vil også kunne transporteres hvis det bundfældes i røret, forudsat luften har et tilstrækkelig højt tryk ved indblæsningen.

1.2 Pneumatiske transportformer

Pneumatisk materialetransport kan defineres som transport af materiale gennem rør ved hjælp af gas (oftest atmosfærisk luft) via enten overtryk eller vakuum.

Man kan generelt skelne mellem to typer transport:

Dilute-phase: Er den mest almindelige form for pneumatisk transport. Den er karakteriseret ved at det materiale man ønsker at transportere opblandes i transportmediet, sædvanligvis luft, hvorefter en kontinuerlig transport af blandingen finder sted. Ved denne transportform vil alle partiklerne holde sig svævende i luftstrømmen under hele transporten

Dense-phase: Karakteriseret ved at materialetætheden er så stor, at kun en meget lille del af materialet svæver. Disse systemer er som regel højtrykssystemer hvor materialet transporteres som ”propper” (såkaldte slugs) eller strenge. På tysk taler man om ”Propfenförderung”

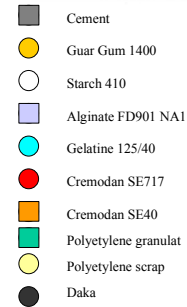
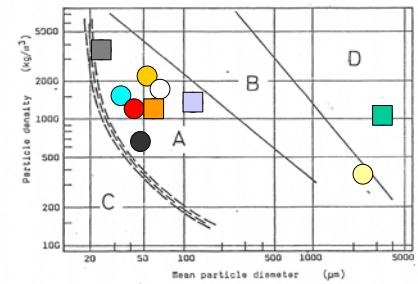
Dense-phase systemer er særdeles energiøkonomiske sammenlignet med tilsvarende i dilute phase idet de benytter sig af højt differenstryk, langsom transporthastighed og dermed små luftmængder. Disse systemer findes ikke analytisk velbeskrevet, (mangler modellering, teoribeskrivelse samt anvisninger vejledning). Systemerne volder derfor en del problemer i industrien.

1.3 Energiforhold

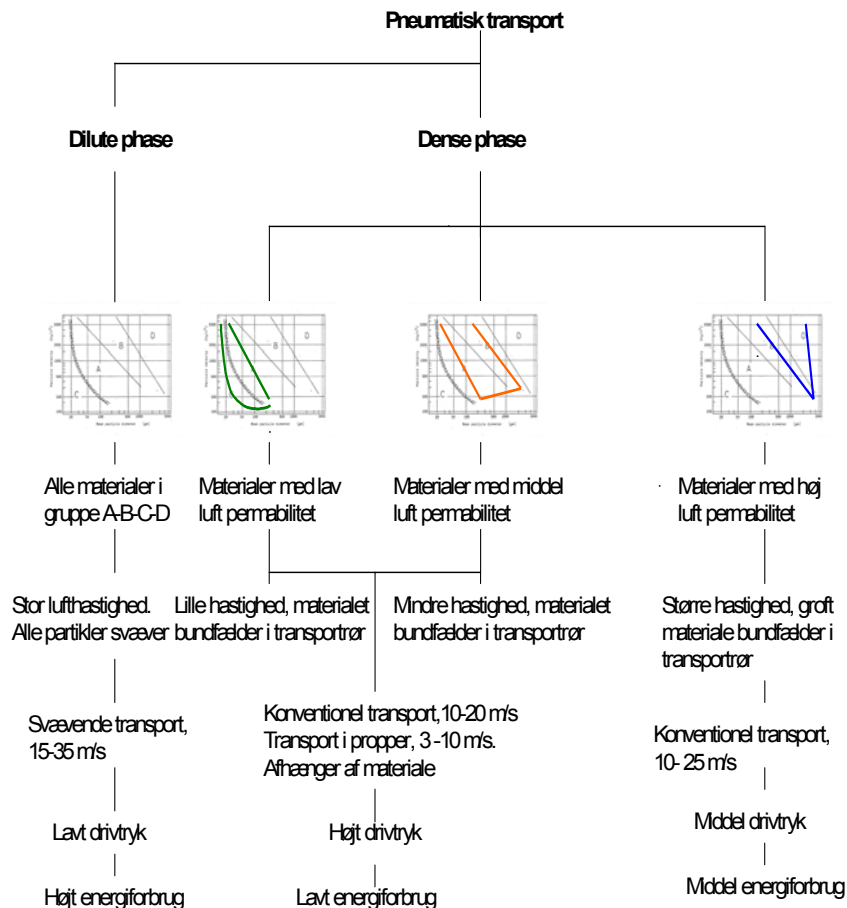
For at kunne karakterisere et givet materiale i forhold til valg af pneumatisk transport metode kan anvendes et såkaldt Geldart diagram (se Figur 1). Denne diagramform karakteriserer materialet som hørende til en typisk zone type.

Diagrammet er således inddelt i et antal zoner benævnt C-A-B-D. Disse zoner er fremkommet som en funktion af værdien for det enkelte materiales partikel densitet målt i kg/m^3 (op af y-aksen) og dets middel partikel diameter (ud af x-aksen).

På Figur 2 er forsøgt anskueliggjort hvordan materialernes beliggenhed i Geldart diagrammet kan influere på de optimale transportbetingelser, når man tager hensyn til det nødvendige energiforbrug



Figur 1: Geldart diagram



Figur 2: Generelle energiforhold som funktion af placering i Geldart diagram

2 Materialetransport i Danmark

Oversigten er struktureret efter erhvervsgrupperingen NR130, som benyttes af Energistyrelsen i deres energimatrix og som også er benyttet i ”Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug” fra Dansk Energi Analyse A/S, September 2000. Oversigten er baseret på generelle vurderinger ud fra forannævnte kortlægning samt brancheanalyser m.m. samt på telefoninterviews med et par snese industrifolk¹.

Branche	Vakuüm MWh/år	Trykluft MWh/år
151000 Slagterier	3.500	6.500
152000 Fiskeindustri	1.000	
155000 Mejerier m.m.	300	200
156009 Fremst. af stivelsesprod.	++	200++
158109 Brødfremstilling	500	500
158120 Bagerforretninger	400	
200000 Træindustri	1.000	1.000
210000 Papirindustri		
210000-222009 Trykkerier mm.		
241209 Farvestoffer mm.		100
241500 Kunstgødning		2.000
244000 Medicinalindustri		1.000
245070 ”Rengøringsmidler”		200
251122 Plastproduktion	6.000	
263053 Cementfabrik		4.000
266080 Gipsprodukter		100
271000 m.fl. Jernindustri osv.	2.000	1.000
361000 Møbelindustri	1.000	
362060 Legetøj mm.	1.000	2.000
Øvrige (løst skøn)	1.000	1.000
Ialt	17.700+	19.800+

Tabel 1: Skøn over elforbrug (MWh/år) til luftbåren transport i industrien

Det skønnes derfor at det samlede elforbrug til luftbåren materialetransport i industrien andrager ca. 38-40 GWh/år.

¹ Dataindsamlingen er rapporteret i ”Energieffektiv intern materialetransport i industri”, Fase 1: Markedsundersøgelse, Projektnr. 334-32, December 2003

3 Potentielle energibesparelser

Nedenstående Tabel 2 sammenfatter resultaterne fra projektet og fra målinger, som projektgruppen tidligere har udført, samt fra information fra litteraturen².

Virksomhed	Transportmedie	Transportform	Specifikt elforbrug kWh/t	Typisk transportafstand m	Transporteret mængde t/h
Danisco Haderslev	Trykluft	Dense phase	2,5	50-70	8 (kapacitet 30)
Forsøg hos Thames Polytechnic	Trykluft	Dense phase	1,4-3,3 ³⁾	250	30
		Dilute phase	3,8-5,2 ¹⁾		
Transport af cement iflg. Ole Beesche	Trykluft	Dense phase	1,6-2,1	50-100	10
LEGO System	Vakuum	Dilute phase	2,9 ⁴⁾	15	0,56
			5,2 ⁵⁾	10	0,2
			25 ³⁾	15-65	0,05
Færch Plast	Vakuum	Dilute phase	12 ⁶⁾ 26 ⁷⁾		3
Danpo Farre	Vakuum	Dilute phase	13	60	1,5
Aalborg Portland	Bånd	Kuvertbånd	0,4-0,7	100 og 275	10
	Snegl	Snegling	0,4	10	14
	Elevator	Kopelevator	0,3	20?	9
	0,2 bar luft (kapselblæser)	Luftbåren	4,3	20	14
Carlsberg Danmark	Bånd	Stålbånd	0,03-0,05 ⁸⁾	12,5	30
Arla Hobro	Transportør	Transportør med tandhjulsaksel	0,04-0,10 ⁶⁾	3	3

Tabel 2: Sammenfatning af energidata for transportanlæg

For eksisterende transportanlæg består den væsentligste mulighed for energibesparelser ofte i at effektivisere det drivende anlæg.

Ved valg mellem forskellige transportformer bør man ud fra en energimæssig betragtning vælge båndtransport, transportør, snegle, kopelevator eller tilsvarende. Men valget afhænger naturligvis af mange andre forhold også og herunder af investeringen, driftsudgifter, pladsforhold, materialehensyn osv.

Ud fra tabellens tal kan man ikke konkludere vedrørende valget mellem trykluft og vakuum, idet det specifikke elforbrug godt nok er lavest for tryklufttransporten, men de transporterede mængder er også væsentligt større.

Benyttes trykluft som transportmedie bør man – alt andet lige – vælge dense phase transportformen, da den er mere energieffektiv end dilute phase.

² Dataindsamlingen er rapporteret i ”Energieffektiv intern materialetransport i industri”, Fase 1: Markedsundersøgelse, Projektnr. 334-32, December 2003

³⁾ Afhængig af transportrørets diameter

⁴⁾ Transporteret mængde størst mulig

⁵⁾ Transporteret mængde er mindre, afhænger af maskinernes efterspørgsel

⁶⁾ Med centralt vakuumanlæg

⁷⁾ Med decentrale anlæg

⁸⁾ Efter og før energieffektivisering af drevudstyr

4 Eftervisning af besparelspotentiale

Som led i projektet der været gennemført en række fuldskala forsøg⁹ på Testanlægget hos PAM maskinfabrik i Kerteminde. Forsøgene har haft til hensigt dels at sammenligne dilute- og dense-phase transport, samt at tilvejebringe et sammenhængende datamateriale til brug for en modellering af energiforbruget ved anvendelse af dense-phase transport.

Anlæggets opbygning giver mulighed for at optimere tryk/luft/materialeforholdet for at minimere energibehovet. Dette kan desuden refereres til en række andre testrapporter fra forskellige kilder. af kg transporteret materiale pr. m³ transportluft, som har været resultatet af en række testrapporter for forskellige materialer som vi har adgang til.

4.1 Dilute Phase

Ved test af Dilute Phase transport blev lufttilførslen vha. frekvensomformer reguleret ned således at en optimering af driften kunne etableres. Forsøget efterviser at en indregulering af driften, dvs. en optimering af den mængde bæreluft som tilsættes kan give besparelser på 30-50% og dermed være helt afgørende for anlæggets energiøkonomi.

		Dense Phase				Dilute Phase			
Afstand	Drøvling	Plast	A-Pet	Cremodan	Alginate	Afstand	VSD	Plast	A-pet
		kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg			kWh/kg	kWh/kg
117 m	100%	1,939E-04			4,028E-04	117 m	50Hz	8,892E-04	2,120E-03
	75%	1,654E-04			3,534E-04		40 HZ	7,114E-04	1,305E-03
	60%	1,559E-04			3,860E-04		30 Hz		1,223E-03
162 m	100%	2,994E-04	1,226E-03	5,666E-04	5,020E-04				
	75%	2,272E-04	7,423E-04	4,188E-04	4,307E-04				
	60%	1,951E-04	8,149E-04		4,057E-04				
267 m	100%	8,197E-04	2,156E-03		1,063E-03				
	75%	5,693E-04			8,067E-04				
	60%	4,764E-04	1,195E-03						

Tabel 3: Uddrag af forsøgsresultater som viser hhv. energireduktion ved reduktion i tilsætning af bæreluft (som resultat af at kompressoren er reguleret ned i tryk vha. en frekvensregulering/VSD). Desuden viser tabellen også eksempel på energireduktionen ved sammenlignelige transportopgaver udført med hhv. dense phase og dilute phase.

4.2 Dense phase

Forsøgene viser desuden tydeligt at der er væsentlig energibesparelse at hente ved at benytte dense phase hvor det er muligt, dvs. hvis materialet egner sig, og de øvrige fysiske forhold desuden er acceptable.

De konkrete forsøg med f.eks. plast granulat, afslører ved sammenligning at:

- hvor materialet transporteres lige langt i identisk rørsystem,

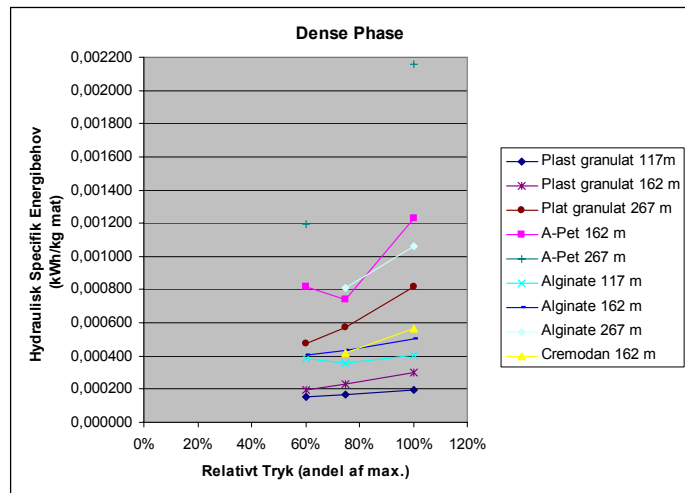
⁹ Forsøgene er udføreligt rapporteret i "Energieffektiv intern Materialetransport i industri" Fase 3: Fuldskalaforsøg, Projektnr. 334-32, August 2004.

- hvor der er sket en optimering af hhv. dense phase og dilute phase transporterne i form af reduktion af tryk og bæreluft

er der en reduktion i det specifikke hydrauliske energibehov på over 75%. Ellers ligger besparelserne på mellem 50-70%.

Forsøgene viser desuden tydeligt at der, ved indregulering af eksisterende Dense phase anlæg kan opnås en kraftig energieffektivisering ved god indregulering.

Ved reduktion af trykket ned mod kritisk værdi (som er defineret som det trykniveau hvor trykket bliver for lavt til at flytte proppen) kan opnås en kraftig reduktion i energi forbruget, i flere tilfælde mellem 30-50% reduktion af det specifikke energiforbrug, se også figur 3.



Figur 3: Figuren viser den tilførte specifikke energi som funktion af det relative tryk til ført for at flytte materialet.

4.3 Økonomisk gevinst

I det følgende har vi sammenlignet fire typiske typer materialetransportanlæg i forhold til de parametre som danner baggrund for en økonomisk sammenligning. Vi har valgt at se på:

- Dilute phase – decentralt anlæg transport: 2,95 m³/time
- Dilute phase – centralt anlæg transport: 2,95 m³/time
- Dense phase transport: 30 m³/time
- Båndtransport transport: 10 m³/time

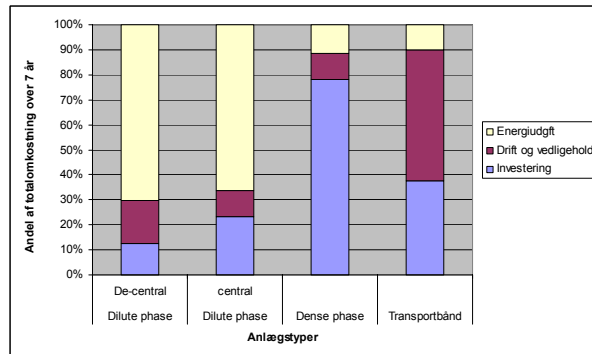
De umiddelbare forudsætninger fremgår af nedenstående tabel:

	Dilute phase De-central	Dilute phase central	Dense phase	Transportbånd
Investering	kr 250.000,00	kr 155.000,00	kr 4.000.000,00	kr 500.000,00
Drift og vedligehold per år	kr 50.000,00	kr 10.000,00	kr 75.000,00	kr 100.000,00
Energiudgift per år	kr 200.812,50	kr 63.112,50	kr 84.150,00	kr 19.125,00
Drifttimer per år	8500	8500	8500	8500
Elpris kr/kWh	kr 0,45	kr 0,45	kr 0,45	0,45
Installeret effekt kW	52,5	16,5	22	5
Antal år	7	7	7	7
Total	kr 2.005.687,50	kr 666.787,50	kr 5.114.050,00	kr 1.333.875,00
Kapacitet, ton/år	24.990	24.990	255.000	85000
Transporteret mængde ton	174.930	174.930	1.785.000	595.000
Afstand, meter	50	50	50	50
Omkostning per ton - kr/ton	11,47	3,81	2,87	2,24

Tabel 4: Økonomisk sammenligning mellem fire typer af materialetransportanlæg

Som det ses i dette eksempel, så kan der opnås væsentlige økonomiske gevinster ved at vælge sit anlæg rigtigt. Det fremgår også af Tabel 4, at dense phase anlæg, set over en 7-årig horisont, og med fuld produktion er det mest økonomiske pneumatiske anlæg, da der her opnås den laveste omkostning per transporteret ton materiale.

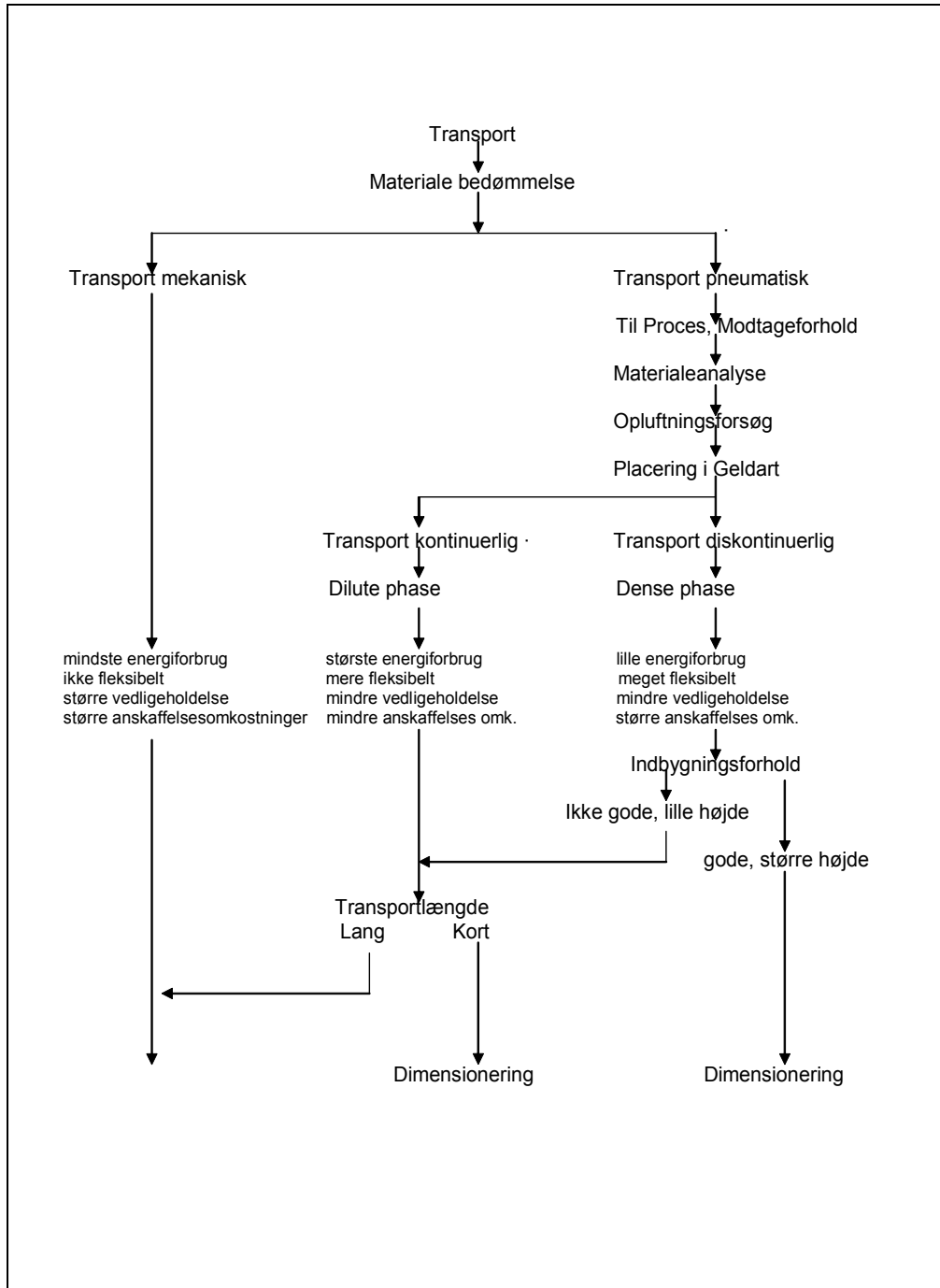
Som det tydeligt fremgår af figur til højre, så er der stor forskel på hvor stor en del de tre parametre udgør for de forskellige anlæg. Som det tydeligt fremgår er dense phase anlæg særdeles investeringstunge.



Figur 4: Investering, D&V samt energitudgift som andel af den samlede omkostning over 7 år

5 Overvejelser ved valg af transportanlæg

Ved valg af nyt transportanlæg, såvel som omfattende ombygninger er der en række generelle overvejelser som bør tages i betragtning. Nedenstående Figur 5 kan give et fingerpeg om hvilke tanker og spørgsmål det kan være gode at få klarlagt.



Figur 5: Oversigt over væsentlige overvejelser ved valg af transportanlæg.

I det følgende er valgene i figuren diagrammet kommenteret og gennemgået:

Når man i en projekteringsopgave står overfor at skulle foreskrive et transportanlæg, med det formål at flytte noget materiale fra et sted til et andet evt. som led i en proces er det yderst vigtigt at man får foretaget de rigtige valg som munder ud i det rigtige anlæg. Det rigtige valg af anlæg skal tage hensyn til flere faktorer og ikke udelukkende til det energimæssige, men det bør naturligvis indgå i overvejelserne. I alt for mange tilfælde har man projekteret efter de forhåndenværende søms princip og ikke gennemanalyseret problemstillingen.

Det materiale der skal transporteres må først bedømmes visuelt.

Drejer det sig om stykformet materiale eller et materiale hvori indgår meget store klumper eksempelvis med diameter Ø100 mm vil det være mest hensigtsmæssigt at anvende ren mekanisk transport, dvs. båndtransport, snegle, elevatorer eller kædeskrabere hvis det drejer sig om meget varmt materiale.

Hvis materialet er enten pulverformet eller granulat eller en blanding af disse vil det være naturligt at anvende en form for pneumatisk transport.

Hvis det bliver mekanisk transport vil vi få et anlæg, som har mindst energiforbrug, som ikke er fleksibelt at montere og som har en relativ stor vedligeholdelse.

Hvis det bliver et pneumatisk transportanlæg vil vi få et anlæg som har et større energiforbrug, som er yderst fleksibelt at montere og som har relativ mindre vedligeholdelse.

Hvis materialet er velkendt, i forbindelse med pneumatisk transport, kan man springe de næste 3 punkter over i det de så vil kunne afklares med tabelopslag fra alm. litteratur, eller f.eks. direkte i Dense Phase Calc. Hvis materialet ikke er velkendt bør man foretage en materialeanalyse som skal belyse dets kornstørrelse og fordeling og eventuelt et opluftningsforsøg¹⁰. Dette har til formål at placere det i Geldarts diagram så faktorer som transporthastighed og hvis dense phase så også drivtryk kan vurderes.

Når vi har valgt pneumatisk transport er der 2 muligheder enten et anlæg der anvender dilute phase princippet eller et som anvender dense phase princip.

For at afgøre hvilket af disse 2 principper der skal benyttes, må vi tage stilling til nogle forhold:

Til hvilken proces skal det benyttes? Man må gøre sig klart at dilute phase princippet er en kontinuerlig proces, men at dense phase foregår diskontinuerligt.

Hvis det således drejer sig om at tilføre materiale til en proces der kræver en konstant materiale tilstrømning kan man ikke umiddelbart anvende dense phase, men må vælge dilute phase. Hvis det derimod drejer sig om at tilføre materiale til en silo eller en beholder vil en dense phase transport være naturlig.

Hvis det er en kontinuerlig transport er der et forhold mere som kan få indflydelse på transportmåden og det er transportens længde. Drejer det sig om en transportafstand på maksimalt ca. 150 m kan man fortsætte med den pneumatiske transport, men hvis afstanden overskrider de 150 m kan vi være tvunget til at anvende en mekanisk transportform da en dilute phase transport har en meget begrænset transportafstand. En anden løsning på dette problem kan være at transportere materialet med dense phase til en beholder umiddelbart før forbrugsstedet og så derfra med dense phase det sidste stykke vej, den endelige løsning må vurderes efter forholdene.

¹⁰ Opluftningsforsøg er udførligt beskrevet i ”Energieffektiv intern materialetransport i industri” Fase 2: Opluftningsforsøg, Projektnr. 334-32, December 2003

Hvis det er en dense phase transport og dermed diskontinuerlig og den skal transportere til en silo er der også et forhold som kan få indflydelse og det er indbygningsforholdene på montagestedet. Det er sådan at i medens en dilute phase løsning ikke kræver ret meget højde da den transporterer hele tiden, så kræver en dense phase transport ret gode indbygningsforhold da den er diskontinuerlig og opsamler en beholder fyldt med materiale som den så sender af sted. Den mængde materiale den opsamler, afhænger af den mængde som skal transporteres, jo større kapacitet der skal transporteres, jo større beholder og jo større højde. Det kan derfor være nødvendigt at vælge en dilute phase løsning i stedet hvis der ikke er højde nok og hvis siloen ikke er ret langt væk eller en mekanisk løsning hvis afstanden er stor.

Dette har betydning hvis man skal indbygge en transport i et eksisterende anlæg, men hvis det er et nyanlæg er man frit stillet og skal blot være opmærksom på dette forhold.

6 Modellering og beregningsværktøj

Alle hidtidige modeller og programmer indenfor området dense-phase har været baseret på de enkelte leverandørers og rådgivende firmaers erfaringer og har som sådan ikke været tilgængelig for udenforstående.

Som led i dette projekt, på basis af ovenstående forsøg, modelberegninger og øvrige erfaringer er der udarbejdet et brugervenligt edb-værktøj - **Dense Phase Calc.** - til brug ved energi- og dimensioneringsovervejelser, i lighed med bl.a. de edb-værktøjer som er defineret indenfor ”rammeprogrammet for energirigtig projektering”.

6.1 Modellering

Ved Dense Phase flow løber en del af materialet ved vandret transport i bunden af transportrøret, hvorfor der må stilles krav til drivkraften på bunden i forhold til rørvægfraktionen.

Disse forhold kan beskrives og modelleres ved hjælp af en række kendetal, hvoraf friktionstallet ”fr” har relevans med hensyn til materialernes egenskaber.

Fysikken bag vægfraktionen kan variere kraftigt, men for at opnå Dense flow følger i praksis et krav om ”fluid-friktion” mod væggen, i det at materialet, eller ”bunken”, går død, hvis friktionen skifter fra ”fluid” til såkaldt ”løs bunke” friktion. Heraf følger to dimensioneringskrav:

- Materialet skal være fluidisbart. Dette krav udtrykker, at materialet ved luftgennemblæsning kan danne et ”mormogent” fluidum, hvor de enkelte partikler ”smøres” af en luftfilm. Dette krav kan i praksis refereres til fluidiseringsteknikken Geldarels klassificering af pulvere på basis af kornstørrelse og partikelrumvægt.
- Transportlængden er bestemt af hvor længe materialet forbliver i fluidiseringstilstanden. Når partiklerne én gang er fluidiseret, vil det ved afbrydelse af fluidiseringsluften gennemløbe et afluftningsforløb, inden det ”sætter sig”. Den tid det tager for materialet at ”sætte sig”, står til rådighed for Dense Phase flow.

Tryktabet hidrørende fra materialet Dense Phase flow kan ifølge Molerus beskrives ved:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = (1 - \phi) \cdot \rho_p \cdot \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p} \right) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot fr$$

hvor:

$\frac{\Delta P}{\Delta L}$	er materialebidrag til tryktabet pr. meter	$\left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$
ϕ	er brøkdelen frit rørtværæsnit over bunken	
ρ_p	er partikelmassefylde [kg/liter]	
ρ_g	er fluidmassefylde [kg/liter]	
ε	er Vo i dag-ration	
g	er tyngdeaccelerationen [m/s ²]	
$\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)$	er materialelitervægt [kg/liter]	
fr	er rørvægfraktion	

ϕ der er brøkdelen frit rørtværsnit over bunken, beregnes ud fra arealet af partikler i røret A_s som findes ud fra beregningen af middelpartikelhastigheden V_{pm} og volumenstrøm af partiklerne V_p .

$$U_{pm} \left(\frac{U_{g1} + U_{g2}}{2} \right) \cdot (1 - 1,01 \cdot 10^{-3}) \cdot (d \cdot 10^3)^{0,3} (\rho_p \cdot 1000)^{0,5}$$

hvor:

U_{g1}	er gassens starthastighed [m/s]
U_{g2}	er gassens sluthastighed [m/s]
d	er partikeldiameter [mm]
ρ_p	er partikelmassefylde [kg/liter]

6.2 Beregningsprogram

Dense Phase Calc er at betragte som foreløbigt i det der indlagt følgende begrænsninger i det:

- Programmet beregner kun transporter i Dense Phase mode. Det er hensigten senere at udbygge programmet således at man kan beregne/sammenligne direkte med Dilute Phase mode også.
- Det er kun muligt at beregne for en transportlængde max. 300 m, dette er inklusive tillæg for bøjninger.
- Der kan kun kalkuleres med én rørdiameter på transporten.

Disse begrænsninger har dog ikke betydning for, ganske simpelt, at kunne beregne energibehovet ved langt de fleste transportopgaver, samt at kunne optimere i forhold til længde, transport hastighed og rørdimension.

6.3 Kalibrering af program

Ved en sammenligning af programmets resultater med vore forsøg hos PAM og nogle forsøgsresultater udført i England, samt vore fra målinger foretaget hos Danisco Haderslev ses en ganske god overensstemmelse i resultaterne, se også tabel . Sammenligningen der er udført for den samme kapacitet, den samme transportlængde udtrykt ved L/D.

Programmet sætter således brugeren i stand til at danne sig et realistisk indtryk af hvordan en pneumatisk transport af et materiale skal dimensioneres for at få den mest energirigtige løsning frem og således være på forkant med situationen i en projekteringsfase.

Materiale	Rørlængde Rørdiameter L/D	Luftmængde forsøg	Tryk. forsøg	Luftmængde Dense Phase Calc	Tryk Dense Phase Calc
Alginate	1671	3,1 m ³ /min	2,0 bar	3,1 m ³ /min	1,9 bar
Alginate	2314	3,1 m ³ /min	2,2 bar	3,2 m ³ /min	2,2 bar
Alginate	3814	3,1 m ³ /min	2,8 bar	3,2 m ³ /min	2,7 bar
Cremodan	2314	2,7 m ³ /min	2,6 bar	2,7 m ³ /min	2,2 bar
Poly granulate	1671	2,4 m ³ /min	1,7 bar	2,7 m ³ /min	1,7 bar
Poly granulat	2314	2,4 m ³ /min	1,9 bar	2,7 m ³ /min	2,0 bar
Poly granulate	3814	3,0 m ³ /min	2,5 bar	3,2 m ³ /min	2,2 bar
Alkalistøv	1160	4,7 m ³ /min	oplysning.	4,9 m ³ /min	1,8 bar
Aluminiumsstøv	1160	4,3 m ³ /min	mangler	4,3 m ³ /min	2,0 bar
Cement	1160	3,9 m ³ /min	for	4,0 m ³ /min	2,4 bar
Cryolite	1160	6,3 m ³ /min	disse	6,2 m ³ /min	1,9 bar
Dekstrin	1160	4,3 m ³ /min	materialer	4,4 m ³ /min	1,9 bar
Hvedemel	1160	3,8 m ³ /min		3,8 m ³ /min	2,0 bar
Kulstøv	1160	3,7 m ³ /min	oplysning.	3,9 m ³ /min	2,0 bar
Melis	1160	4,9 m ³ /min	mangler	4,9 m ³ /min	1,8 bar
Mælkepulver	1160	4,3 m ³ /min	for	4,3 m ³ /min	1,9 bar
Perlite	1160	1,2 m ³ /min	disse	1,3 m ³ /min	1,6 bar
Pozzolane	1160	6,7 m ³ /min	materialer	6,7 m ³ /min	2,1 bar
Træmel	1160	5,4 m ³ /min		5,3 m ³ /min	1,6 bar
Alginate	1422	2,35 m ³ /min	2,5 bar	2,34 m ³ /min	2,2 bar
Guar Gum	1238	2,55 m ³ /min	1,6 bar	2,58 m ³ /min	1,9 bar

Tabel 5: Kalibreringsresultater af Dense Phase Calc

7 Dense Phase Calc

Programmet er designet mhp. stor brugervenlighed og fordrer ikke stor forudgående teoretisk viden om pneumatisk materialetransport. Det henvender sig derfor bredt til bla.:

- Potentielle købere af pneumatiske transportanlæg
- Energikonsulenter og rådgivere
- Fabrikanter og leverandører af pneumatiske transportanlæg

Rapporten indeholder i Bilag 1 en kort manual til Dense Phase Calc.

7.1 Materialedata og andre basale parametre

I programmet er indlagt materialedata for en række materialer som vi har udført forsøg med eller som andre har udført forsøg med og som vi har haft adgang til. Disse data danner grundlaget for beregningerne. På programmets startside findes desuden en række indgangsparametre ud over materialet og disse er:

- den mængde materiale som ønskes transporteret pr time,
- den samlede transportlængde,
- den ønskede hastighed ved transportens udløb, og
- den rørdiameter som ønskes benyttet, (dette sidste punkt er indrettet således at der er indlagt en tabel med de mest benyttede rørdimensioner som man kan vælge fra).

På siden er også nævnt oplysning om luftens indsugningstemperatur og denne kan ændres hvis det er relevant.

7.2 Anvendelighed og energiøkonomi

Programmet kan anvendes til at beregne materiale transporter som baseres på Dense Phase mode og dette foregår ved et driftstryk på imellem 3 og 7 bar normalt, afhængig af transportlængde og kapacitet, men kan ved små belastninger på korte afstande gå ned til omkring 1.5 bar. Ved Dilute phase bevæger man sig i området fra under 1,0 bar over i vakuum.

Programmet indeholder på startside en rubrik hvori man bliver orienteret om den energiøkonomiske situation for de valgte parametre og her kan man løbende orientere sig.

Inden man vil til at sammenligne programmets resultater med data fra det virkelige liv skal man være opmærksom på at en beregning af en transport af et materiale er en retningslinie for hvordan den vil kunne finde sted, det er ikke en eksakt størrelse.

Hvis driftstryk eller luftmængde er en smule anderledes end beregnet vil det ikke forstyrre driften. Man arbejder, som nævnt i tidligere rapport med en driftsform hvor man sætter materialebeholderen under tryk inden transporten, men man kan også vælge ikke at sætte den under tryk først. Det tryk man kommer til at arbejde med vil være ret forskellig i de 2 tilfælde, men energiøkonomisk betraget vil den transport med det højeste driftstryk være den bedste.

Når man anvender programmet bør man derfor prøve at ændre på henholdsvis rørdiameter, sluthastighed og evt. kapacitet for derigennem at gennemarbejde projektet bedre.

Det forholder sig sådan med disse transportere at det antal kg materiale man kan transportere for hver m³ luft man blæser ind varierer stærkt med transportlængden, forudsat samme rørdiameter.

Derfor er det sådan at man regner med forholdet imellem transportrørets længde og dets diameter angivet som L/D og det er med dette forhold det transporterede antal kg materiale pr. m³ luft ændrer sig, således at jo større tallet L/D er jo færre antal kg materiale pr. m³ luft kan man transportere

7.3 Anbefalinger til forbedringer

DensePhase programmet:

Det kan anbefales at programmet udvides med følgende:

- Der angives dimension på anbefalet massefylde my for materialevalg.
- På udskriften angives alternativt trykket i bar
- På udskriften angives Beholdervolumen som anbefalet minimum volumen
- At vælge en rørstrækning med flere rørdimensioner
- At vælge transportstrækninger med en længde op til 1500m
- At vælge et andet beholdervolumen, dette bør indgå i beregningen.
- At udvide materialevalget
- At forlade programmet uden først at skulle igennem udskrift
- En lidt mere brugervenlig opsætning af startboksen
- At der tilføjes anbefalet sluthastighed ved materialevalget
- At man kan foretage materialevalg uden at beregningen starter, denne bør startes fra startside med en rubrik: start beregning.
- At programmet udvides til at kunne dimensionere dilute phase inkl. vakuum

Supplerende/nye undersøgelser:

Det kan anbefales at der udføres følgende undersøgelser af udstrømning fra en pumpebeholder:

- Undersøgelse af udtømning i pumpebeholderens top.
- Undersøgelse af virkning med pulserende lufttilsætning i udløb.
- Lufttilsætning i beholder og udløb styret af trykindikatorer i transportrør.
- Undersøgelse af udtømningsgrad / hastighed med tangentiel luftindblæsning i pumpebeholderen.
- Undersøgelse som punkt 4, men med pulserende luftindblæsning.

Disse forslag vil kunne forbedre udtømningshastigheden og dermed mindske energiforbruget.

Herudover bør der undersøges omkring strømningen i transportrørene:

- Undersøgelse af transport igennem rør med påmonteret by-pass ledning.
- Undersøgelse af tryktab i bøjninger i afhængighed af radius/diameter forhold.

Punkt 1 og 2 vil medføre energibesparelser, men størrelsen afhænger af materialet.

Punkt 3 vil have betydning for materialer som er vanskelige at transportere da det vil imødegå propdannelser i røret.

Punkt 4 og 5 vil have betydning for de materialer som er vanskelige at få til at strømme ud af beholderen og dermed mindske energiforbruget.

Punkt 6 vil medføre at man generelt kan øge materiale/luft forholdet og derved mindske energiforbruget

Punkt 7 vil en mere energirigtig projektering.

8 Bilag 1: Manual til brug af programmet DensePhaseCalc

Programmet **DensePhaseCalc** er et nyt program under udvikling og den første udgave her er lavet på baggrund af forsøgsresultater og erfaringer som fremkom under den første del af projektet. Programmet er foreløbig kun beregnet til at dimensionere pneumatisk transport i dense phase mode, men tænkes senere udvidet til at kalkulere også i dilute phase mode.

I denne udgave har programmet nogle **begrænsninger**:

Den første er at det kun er muligt at kalkulere på en transportstrækning til **max. 300 m**. Dette er af hensyn til at det ved større længder er hensigtsmæssigt at udføre transportrøret i spring således at man starter med én diameter og fortsætter med en større længere fremme og så videre. Dette er en udvikling som kommer til i næste udgave.

Den næste er, som at der kun må anvendes **én rør dimension**.

Herunder hovedskærbilledet i Dense Phase Calc:

1: Man starter dimensioneringen med at finde det **materiale i databasen** som man vil transportere. Dette gøres ved at klikke i rubrikken: **Hent materialekonstanter**, det åbner en dialogboks hvori man øverst kan åbne en liste med en lang række forskellige materiale værdier. Det er sådan at findes materialet ikke i listen må man ved at få undersøgt materialet nærmere med hensyn til rumvægt, kornfordeling, og afprøvning iht. listen "simple materialetests" og fastslå hvilket materiale det er mest sammenligneligt med.

Man slutter med at klikke i rubrikken nederst: **Accepter værdier**, dette lukker boksen og starter kalkulationen. Hvis man ønsker først at indtaste de relevante data i de næste punkter kan man vente **med at aktivere den sidste rubrik** til det er gjort.

Skærbilledet "Udvælg materiale værdier":

2: Der på angiver man den **samlede mængde materiale i t/h** man ønsker at transportere.

3: Derefter skal den totale transport afstand bestemmes. Dette udregnes som **vandret** længde plus **lodret** højde plus et **tillæg på 5 m** for hver **90° bøjning** der påtænkes på ruten. Her kan man slå 2 på 45° sammen eller 3 på 30°
Der skal også lægges **5 m** til for hver **skifteanordning** der tænkes anbragt.

4: Nu skal man vælge en egnet rørdiameter. Der findes i programmet en liste over de normalt benyttede rør efter **ISO 4200**. Det er sådan at man kan benytte rør efter alle standards, men det er som regel en fordel med sømløse rør af hensyn til friktion.
Man **vælger en dimension som forekommer rimelig i første omgang**.

I rubrikken iteration på my:

5: Man skal nu angive en ønsket sluthastighed for materialet ved aflevering til modtager. Man vil normalt være interesseret i at denne er så lav som muligt, da en for høj hastighed koster både energitab og forøget slid. På en afstand af **100 til 300 m** vil det normalt være **12-16 m/s**, men det afhænger afstanden og i nogen grad af materialesammensætningen. Hvis denne er **pulver eller granulat så passer det**, men er det med **store stykker iblandet** bør man gå op imod **20 m/s**.

Der findes 3 andre rubrikker i Input data

- 6:** Gaskonstanten, den skal normalt ikke røres
- 7:** Gastemperatur, den skal korrigeres hvis den indsugede kompressorluft afviger
- 8:** Fyldekoefficient, den skal normalt ikke røres

Nu er indtastningen færdig

Programmet vil nu komme ud med følgende resultater:

I rubrikken supplerende outputværdier:

A: Det beregnede luftforbrug til transporten angivet i m^3/s

B: Den beregnede hastighed ved transportens start i m/s

C: Den beregnede hastighed ved transportens slutning i m/s

D: Det beregnede **my** dvs. transportøkonomien udtrykt ved kg materiale transporteret pr. anvendt luftmængde i m³ eller i kg, man kan skifte imellem dem.

I rubrikken iteration på gas:

E: Det samlede trykfald udtrykt i **Pa**. Bemærk at **1Pa = 0,00001 bar**

I rubrikken energibetragtning:

F: Det samlede effektforbrug i **kw**

G: Energiforbruget pr. kg flyttet materiale i **kwh/kg**

Når man trykker på: **Gå til afslutning** kommer en oversigt over alle beregnede data inkl.

H: Et forslag til beholdervolumen for transport beholderen

I: Plads til at skrive Opgavens navn, Projektnummer, udført af og dato

Når man herefter har angivet i hvilket katalog man vil save filen trykker man på

Vis html og gem på disk og så kommer rapporten frem og kan skrives ud på normal vis. Man kan også blot vælge at lukke siden ned – filen er gemt på disk.

Vær opmærksom på størrelsen af det beregnede **my** i forhold til det som er angivet i **materialedata**. Man kan godt tillade en afvigelse. Hvis den foreslåede værdi er mindre, så er det et udtryk for at det transporteres mindre materiale i forhold til luftmængden og det betyder ikke noget for transporten, men den bliver dyrere. Hvis, derimod, værdien bliver større er det omvendte tilfældet og her må grænsen sættes til ca.+35 % i denne udgave af programmet, sættes **my** værdien for højt risikerer man at transporten hurtigt går i stå da transportrøret blokeres, jo større afvigelse jo større risiko. Værdien kan godt overskrides, men da det er meget materialeafhængigt bør det kun ske efter en transporttest.

My værdien er som nævnt, et udtryk for hvor meget materiale der transporteres pr. luftmængde og nedenfor gennemgås hvordan det varierer med skiftende diametre og hvordan der er afhængighed imellem rørdiameter, transportlængde og energiforbrug.

Her er et par eks.:

Først Polyetylene granulat 8,2 t/h

L= 267m, Rørdiam. Ø_i= 70,3 mm, Hastighed slut v= 13,5 m/s

Resultat: trykfald Tf= 3,63 bar my= 35,4 kg/kg Energiforbrug E= 8,22 kW

Ændres rørdiam. til Ø_i 76,1 fås

Trykfald Tf=3,2 bar, my= 30,6 kg/kg, E= 8,44 kW

Gøres rørdiam. mindre Ø_i= 67,2 fås

Tf= 3,9 bar, my= 38,8 kg/kg, E= 8,06 kW

Gøres rørdiam. større Ø_i= 100,8 får vi

$T_f = 2,13$ bar, $m_y = 17,4$ kg/kg, $E = 8,99$ kW

På denne måde kan man undersøge konsekvenserne af en ændring i layout.

Ovenfor ses at når m_y bliver mindre, så stiger energiforbruget og omvendt at når m_y bliver større så falder det. Dette er en følgevirkning af at ændre transportrøret til en anden diameter.

Hvis vi tager et eksempel med et andet materiale på en anden distance får vi følgende resultater:

Transport af Alginate 7,65 t/h

$L = 162$ m, Rørdiameter $\varnothing_i = 70,3$ mm, sluthastighed $v = 14,1$ m/s

Resultat Trykfald $T_f = 2,08$ bar, $m_y = 32$ kg/kg, Energiforbrug $E = 4,42$ kW

Gøres rørdiam. større $\varnothing_i = 76,1$ fås

$T_f = 1,90$ bar, $m_y = 27,3$ kg/kg, $E = 4,45$ kW

Gøres rørdiam. mindre fås:

$T_f = 2,18$ bar, $m_y = 34,6$, $E = 4,39$ kW

Hvis vi nu gennemarbejder projektet og finder ud af at det med en ændret rørføring bliver 17m kortere får vi. For $L = 145$ m

$T_f = 2,05$ bar, $m_y = 34,6$ kg/kg, $E = 3,96$ kW

Ovenfor se den samme tendens som ved det andet materiale, men også at det kan betale sig at gennemarbejde en rørføring og evt. gå på kompromis med det arkitektonisk rigtige og eks. føre et transportrør skråt hen over loftet i stedet for at lade det følge langs væggen.