Hvordan kan bilindustrien bedst bidrage til miljømæssig bæredygtighed?

Af Professor M.R. Jolly, PhD, BMet, Professor of Sustainable Manufacturing og Dr. K. Salonitis, PhD, MBA, Dip. Eng., Senior Lecturer in Manufacturing Systems, Cranfield University, Cranfield, United Kingdom.

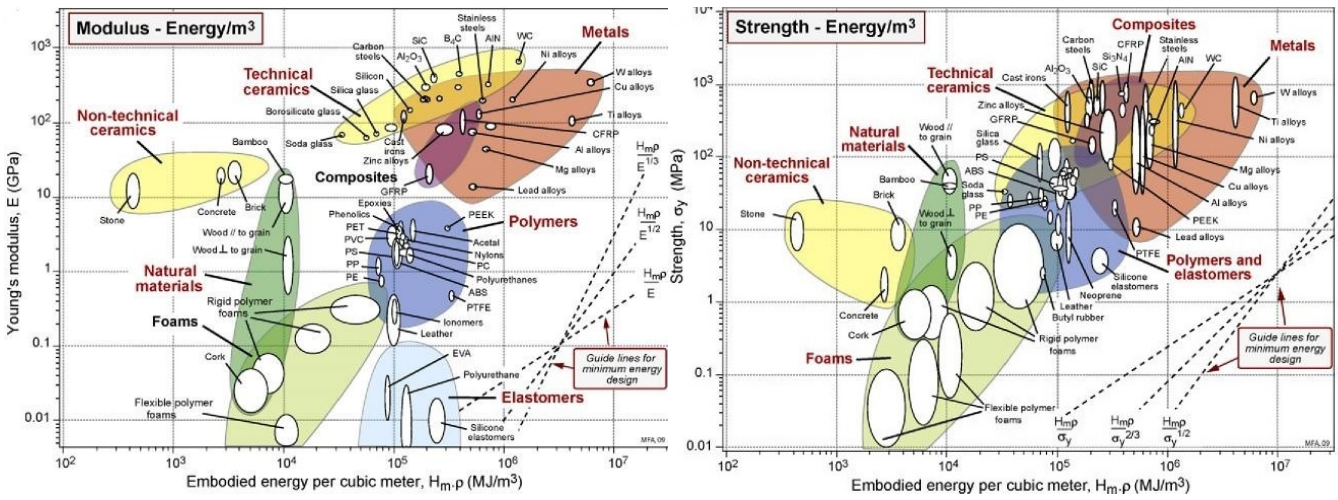
Sammenfatning

Lovgivningen for bilindustrien fokuserer for øjeblikket på CO_2-emissioner fra bilernes udstødningsgasser uden at tage hensyn til CO_2-fodaftrykket fra de materialer, der anvendes til fremstilling af biler. Derfor anvender OEM'er (Original Equipment Manufacturer/Den originale produktfremstiller) materialer med lavere massefylde, der bidrager til lettere biler og dermed forbedret brændstoføkonomi, i forventning om, at dette vil give en netto CO2-fordel for samfundet.

Denne rapport vil præsentere resultaterne af en fuldstændig vurdering af energi- og CO_2-påvirkning under fremstillingen af motorblokke til diesel- og benzin. Undersøgelsen er baseret på input fra over 100 eksperter fra bilforsyningskæden i hele verden, herunder virksomheder der driver minedrift til udvinding af råmaterialer, smelteværker, genanvendelsesvirksomheder af aluminiumlegeringer, jern- og aluminiumsstøberier, OEM-ingeniører, uafhængige produktspecialister, designkonsulenter, varmebehandlings- og imprægneringsvirksomheder. Til trods for al den viden, resulterer anvendelse af materialer med lavere massefylde ofte i øget energiforbrug og CO_2-udslip, når man tager hele livscyklussen i betragtning. For den 1,6-liters aluminiumsmotorblok, som er anvendt som eksempel i denne undersøgelse, kræves mere end 200.000 km vejkørsel for at kompensere for energiforbruget og CO2-emissionerne i fremstillingsfasen. Rapporten kommenterer også andre miljøpåvirkninger fra jern- og aluminiumproducenterne. Disse resultater giver nyt faglig indsigt til OEM-beslutningstagere og et nyt perspektiv for lovgivere til at definere regler, som virkelig bidrager til miljøet og samfundet.

Indledning

Denne rapport er et resultat af forskning baseret på udtalelser fra over 100 industrieksperter fra OEM'er, designbureauer, støberier, varmebehandlings-, genanvendelses- og maskinbearbejdningsvirksomheder i hele den vestlige verden, og er yderlige baseret på en omfattende littera-



Figur 1: a) Youngs modul og b) Trækstyrke som en funktion af det totale energibehov pr. kubikmeter materiale. Bedste resultater er i øverste venstre hjørne, dvs. højeste værdi af Youngs modul eller styrke for laveste energibehov. Støbejern er i så ud fra disse kriterier at foretrække. (Allwood et al. [3])

turgennemgang fra over 100 kilder.

Lovgivning for bilproduktion med hensyn til CO_2-bidrag er udelukkende rettet mod udstødningsemissioner og deres reduktion. Der tages ikke hensyn til at inkludere CO2-fodaftrykket af de materialer, der anvendes til bilfremstilling. Følgelig er udtrykket "letvægt" blevet associeret med at bruge materialer med lavere massefylde i overbevisningen om, at dette skal have reduceret et køretøjs CO_2-fodaftryk. Når fremstillingen af energi diskuteres, hører vi ofte udtalelser såsom, at "genanvendt aluminium kun kræver 5% energi i forhold til primær aluminium". [1] Denne udtalelse ignorerer energibehovet fra hjælpeprocesserne, der anvendes for at få genbrugsmaterialet i en tilstand, hvor det kan genanvendes.

I 2008 Ashby et al. [2] offentliggjorde en hvidbog, der sammenligner de virkelige energibehov til fremstilling af bilkomponenter delt op på to faser, nemlig "materialefasen" (dvs. ekstraktion og produktion af selve materialerne til brug for en fremstillingsfase) og "brugsfasen" (dvs., hvor de formgives til det endelige produkt). Deres konklusioner viser klart, at den energi, der anvendes under en "brugsfase" af et køretøj er meget større end den under materialets "materiale" fase. Et andet afsnit i hvidbogen ser på konsekvensen af at erstatte en stålkofanger med en vægt på 14 kg med en aluminiumkofanger på 10 kg. Deres konklusion er, at break-even punktet for anvendelse af aluminium først ligger ved 200.000 kørte km. Med andre ord skal bilen køre 200.000 km før letvægtsfordelen viser sig. Dette skyldes, at aluminium, sammenlignet med stål, kræver et enormt energibehov under både elektrolyse- og bauxitkonverteringsstrinnene i den primære aluminiumproduktion. Figur 1 viser specifikke energibehov som mulige designkriterier for beskyttelse af miljøet [3].

På GIFA 2015 blev der fremlagt en rapport med et lignende tema, nemlig sammenligning af motorblokke støbt i jern og aluminium [4]. Resultaterne viste, at break-even punktet for CO_2-emission var længere ud i fremtiden end bilens levetid. Motorblokken er en af de største enkeltkomponenter i et køretøj, og rapportens forfattere mente, at det var absolut nødvendigt at undersøge bilernes CO2-fodaftryk, når et tungere men mindre miljøbelastende materiale (Fe-baseret) erstattes med et lettere men mere energibelastende materialer (Al-legeringer).

Vigtige spørgsmål

Med baggrund i de to nævnte rapporter er der tre vigtige spørgsmål, nemlig:

- Hvad er den bedste måde at vurdere et køretøjs miljøpåvirkning på?
- Er vægtreduktion af en bil altid den bedste måde at reducere køretøjets miljøpåvirkning på?
- Hvordan skal designingeniører vælge de rigtige materialer med den laveste miljøbelastning gennem hele livscyklussen for de materialer, der anvendes til fremstilling af biler?

Anvendte metoder

Udover at forske i litteraturen blev der som tidligere nævnt kontaktet over 100 eksperter fra hele kæden af komponentproducenter til bilindustrien. Konkrete energiinformationer blev indhentet fra mange af disse virksomheder, og hvor disse producenter ikke var tilgængelige, blev de teoretiske data bekræftet ved anvendelse af flere referencekilder. Det samlede energiforbrug over en livscyklus blev beregnet ved anvendelse af metoder, der tidligere er offentliggjort i litteraturen af forfattere, såsom Brimacombe et al. [4].

Den første opgave var at vælge en repræsentativ motorstørrelse for at sikre, at undersøgelsen ikke vedrørte et nicheprodukt. En undersøgelse foretaget af Trechow i 2011 [5] viste, at der var en tendens til, at anvendelse af en 4-cylinder rækkemotorer ville stige fra ca. 58% til ca. 71% af verdensmarkedet i 2016. Efter samtaler med en række leverandører til bilindustrien blev det besluttet at vælge en motorblok til en 1,6 L 4 cylinder rækkemotor som repræsentativ motorblok til en moderne personbil. Dette valg blev bekræftet af opfølgende samtaler med OEM-virksomheder. Denne slags motorer findes i både diesel- og benzinversioner og i både støbejern og aluminiumslegeringer.

For at kunne gennemføre undersøgelsen blev der udvalgt nogle specifikke godsvægte for hver version af de 4 forskellige motorblokke. Aluminiumsmotorblokke anses ofte for at være betydeligt lettere end støbejernsmotorblokke. Men på grund af det faktum, at støbejern er signifikant stærkere end aluminiumslegeringer, er vægtforskellen på de færdige produkter ikke så stor, da støbejerns specifikke styrke og stivhed (dvs. styrke/densitet og elastisk modul/densitet) muliggør anvendelse af tyndere godstykkelser. Baseret på resultaterne af den omfattende brancheundersøgelse blev en vægtforskel på 9 kg vedtaget for 1,6 L benzinmotorblokken og 11 kg for 1,6 L dieselblokken. Støbejern har en densitet, der er næsten 3 gange så stor som aluminiumslegeringer, og derfor har en støbejensblok, også med en vægtforskel på 9-11 kg, en betydelig volumenreduktion på ca.55% i forhold til en tilsvarende Al-legeringsblok. Derfor er en motorblok i jern mere kompakt, og motoren har ofte et højere effekt. I en mere kompakt motor bliver forskellige motordele, fx krumtap- og knastakslen også mindre. Artiklens forfatterne har baseret deres beregninger på motorblokkenes vægtforskelle på henholdsvis 7 kg og 9 kg for benzin og diesel; dette er blevet verificeret af en række designkonsulenter og OEM›er.

En anden vigtig overvejelse er, hvor meget brændstofbesparelse

der kan opnås for hvert kg, der er sparet i motorblokkens vægt. Baseret på generelt accepterede industristandarder ville man til at begynde med regne med 6% for hver 5-10% i vægtbesparelse. Nyere undersøgelser [6] [7] har dog vist, at dette måske ikke er muligt, men at gennemsnitligt 4,6% er mere sandsynligt, men tallet kan faktisk være så lavt som 3% - disse tal har en betydelig effekt på materialeudskiftningens break-even punkt. Nærværende undersøgelse har lagt sig fast på en brændstofbesparelse på 4,6%, da det er den værdi, der er aftalt for 2017 EPA midtvejsrevision i USA [7]. En NRC-rapport fra 2010 [8] fastslår, at for 1% og 5% vægtbesparelse bliver brændstofbesparelser på 0,3% og 3,3% mulige.

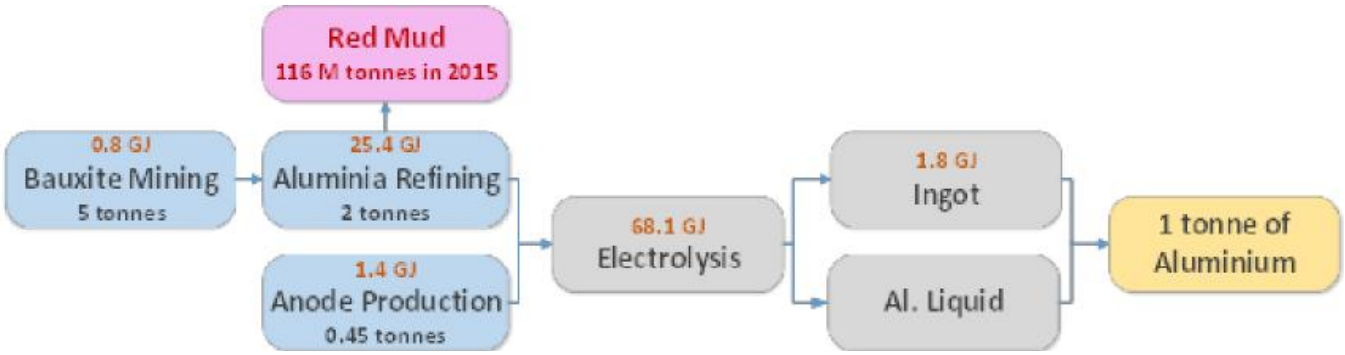
Tidligere arbejde fra forfatterne [9] [10] har undersøgt det samlede energiforbrug over en livscyklus fra vugge til grav, og det blev besluttet at anvende den samme beregningsmetode.

Det samlede energiforbrug over en livscyklus for en støbt motorblok

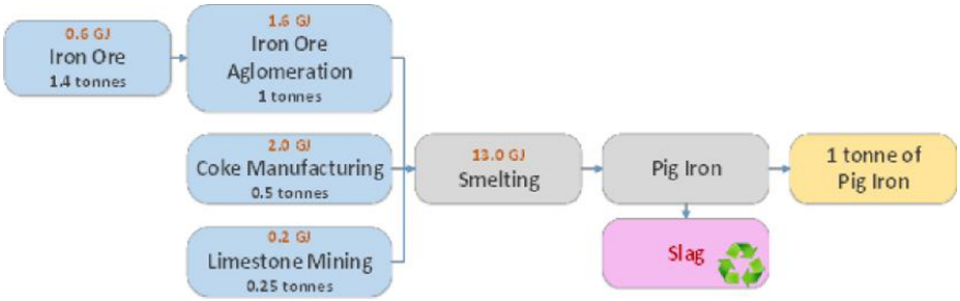
Fremstilling af primær materiale

Det er vigtigt at kende energien, der anvendes til fremstilling af primære materialer. Aluminium produceret ved elektrolyse kaldes "primær aluminium" og aluminium, der genbruges ved omsmeltning, kaldes "sekundær aluminium". Allwood og Cullen [1] mener, at tallet for primær aluminium er af størrelsesordenen 170 GJ / ton, og for primær jern eller stål er tallet ca. 35 GJ / ton. Tal fra en række hjemmesider og publikationer giver værdier for primær aluminium fra 50 til 100 GJ / ton og for jern på 20 til 40 GJ / ton. For at sikre, at denne rapports forfatterne forstod den fulde livscyklus, blev det besluttet at gå tilbage til begyndelsen og beregne energiforbruget fra minedrift til primær materiale for både primær aluminium og primær jern. Disse tal kan derefter anvendes i de korrekte proportioner som materialesupplering til de undersøgte skrotbaserede støbeprocesser. Figur 2 viser de forskellige produktionsfasers energiforbrug til fremstilling af 1 ton flydende aluminium. Det fremgår af figuren, at 1 ton primær aluminium kræver 98 GJ energi eller 265 GJ / m3.

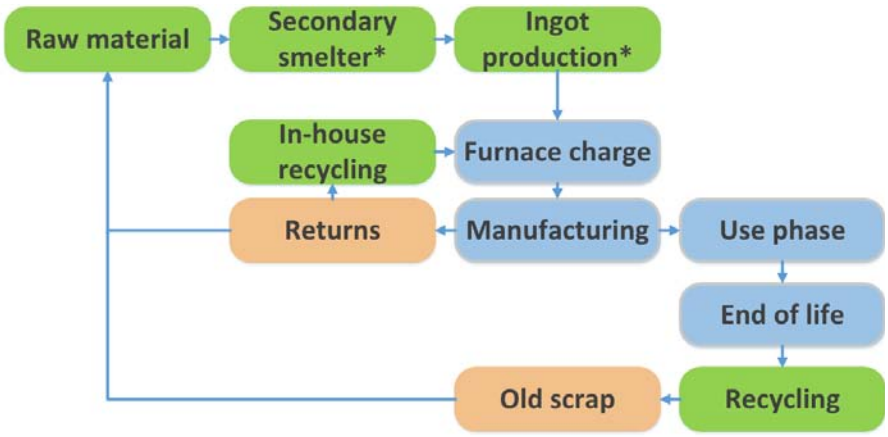
En lignende beregning kan udføres for råjernsfremstilling fra en højovn. Figur 3 viser det tilsvarende procesflowdiagram og tilhørende energier til jern. Det totale energiindhold for 1 ton primær jern er beregnet til at være 17 GJ eller 125 GJ / m3.



Figur 2: Fremstilling af primær aluminium med tilhørende energiforbrug i forskellige procesfaser for at producere 1 ton aluminium. Bemærk også, at der for hvert ton aluminium dannes et affaldsprodukt på 2 tons rødslam, der har en pH-værdi på 13 og derfor ikke kan anvendes og som er en trussel mod nærmiljøet.



Figur 3: Procesfaser i produktionen af primær jern med tilhørende energibehov for at producere 1 ton råjern. Bemærk, at biproduktet fra højovnen er slagger, der anvendes som betontilslag.



Figur 4: Skematisk fremstilling af genvindingsfaser for materialegenanvendelse. Omgangsjern (Returns) er det interne genbrugsmateriale fra indløbssystemet og vrag. Støbejernsskrot (Old scrap) er udtjent støbegods, fx en motorblok eller et andet støbt produkt.

** Omsmeltning (Secundary smelter) og blokkefremstilling (ingot production) gælder kun for Al-legeringer.*

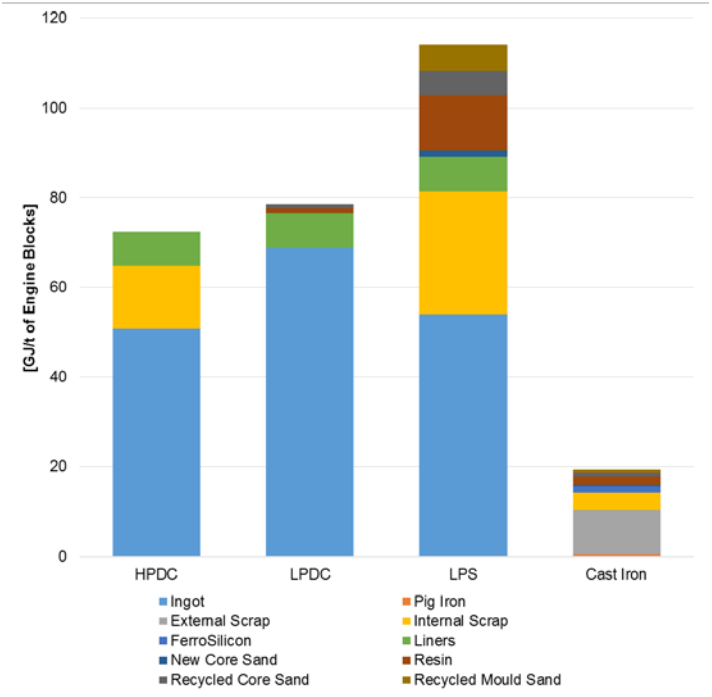
Genbrugsmaterialer der indgår i chargesammensætning

De fleste støberier har en chargesammensætning hvori der indgår en vis del genanvendelsesmaterialer. Råjernsindholdet i en støbejernscharge afhænger i høj grad af smeltemetoden. Smeltning i kupolovne kræver en forholdsvis høj andel råjern mens smeltning i induktionsovne kun minimal eller ingen tilsætning af råjern. I denne rapports beregninger er der anvendt en chargesammensætning med en forholdsvis stor andel råjern for at kunne omfatte de fleste chargesammensætninger, herunder kupolovnscharger.

Støbejernsstøberierne brugte en chargesammensætning med en stor andel stålskrot blandet med omgangsjern og støbejernsskrot. I denne undersøgelse regnes med at støbejern består af 91% genanvendt materiale, hvilket afhængigt af dets oprindelse (eksternt eller internt) har et energiindhold på henholdsvis 10 GJ / t eller 4 GJ / t.

De chargeringsmaterialer, som støberier bruger til fremstilling af motorblokke, kommer fra 2 forskellige kilder - eksternt genanvendelsesmateriale (nyt skrot, gammelt skrot, spåner og metalholdige slagger) og internt genanvendelsesmateriale (primært omgangsjern). Forholdet mellem disse kilder kan være forskelligt. I nogle tilfælde (mest almindeligt blandt aluminiumsstøberier) kan metallet, der er opsamlet fra produktionsprocesser (nyt skrot), fuldstændigt oparbejdes af eksterne genanvendelsesproducenter i form af lukket genbrugskredsløb. Figur 4 illustrerer de fælles faser for materialegenanvendelse gældende for de i rapporten medvirkende støberier.

Ofte påstås, at energiforbruget ved produktion af sekundær aluminium kun udgør 5% af energiforbruget af primær aluminium.



Figur 5: Materialernes gruppeopdelte energiforbrug pr. ton motorblok

[1] Aluminiumgenanvendelse omfatter imidlertid også processer til findeling, forbehandling, gensmeltning og legeringstilsætning samt blokkeudstøbning. Det anslås, at disse processer tilføjer 5,7 GJ/t genbrugt eksternt skrot til det totale produktionsenergiforbrug i støberiet.

De i undersøgelsen deltagende aluminiumsstøberier anvendte meget forskellige chargesammensætninger. Støberier med lavtrykstøbning i kokiller (LPDC) anvendte 100% "primær aluminiumsblokke" (A356) og hævdede, at der ikke var nogen intern genanvendelse. De i undersøgelsen deltagende støberier med lavtrykstøbning i sandforme (LPS) støbte udelukkende i en kernepakket???? og anvendte en kombination af sekundær aluminiumsblokke og ca. 35 % omgangsmetal (A319 -legering) samt genbrugs Al-blokke for at kompensere for smeltetab, så hele chargesammensætning bestod i det store og hele af genbrugt materiale. Støberier med højtrykstrykstøbning i kokiller (HPDC) anvendte en høj andel (27%) internt skrot, der blev tilsat til A380/383 sekundær aluminiumsblokke. Beregninger baseret på det bedst opnåelige genanvendelsesresultat gav værdier for det totale energiforbrug på henholdsvis 32, 24 og 25 GJ/t for LPS, LPDC og HPDC. Disse forskellige værdier skyldes genvindingens omsætningshastighed.

Andre materialer anvendt til motorblokproduktion

Jern er også et råmateriale, der indgår til fremstilling af motorblokke i aluminium, da flertallet af sådanne blokke har cylinderforinger af jern, enten istøbt eller presset ind. Disse foringer fremstilles normalt centrifugalstøbt med rigeligt bearbejdningstillæg. Baseret på tilbagemelding fra OEM'er i industriundersøgelsen klarlagde den nuværende undersøgelse, at foringerne blev støbt med 8 mm vægtykkelse og blev forbearbejdet til 5,5 mm før istøbning. Efter støbning blev foringerne bearbejdet færdigt ned til 2 mm vægtykkelse, og selv når der antages at 95 % af materialet er genanvendt skrot, er den totale procesenergi pr. sæt af fire foringer 188 MJ eller 12 GJ / t.

Med hensyn til legerings- og behandlingsmaterialer omfattede undersøgelsen det totale energiforbrug for alle legeringselementer, der findes med mere end 1% i det endelige støbegods. For aluminiumslegeringerne drejer det sig om kobber (13,5 GJ / t) [11] og silicium (122 GJ / t) [11]. Til støbejern tilsættes ferrosilicium for at forbedre jernets korn- og grafitstruktur. Energiforbruget for at producere 1 ton ferrosilicium er ret høj, lidt over 30 GJ. Tilsætningsmængden er imidlertid minimalt, så det bidrager med blot 1,6 GJ / t motorblok i jern.

Almindelig sandstøbning, kokillestøbning med sandkerner og lavtryk sandstøbning er alle processer, der anvendes til fremstilling af cylinderblokke. Her er der et energiforbrug i forbindelse med minedrift, behandling, transport og binding af sandet. Dette energiforbrug ligger i området ca. 2,3 GJ /t til 5,8 GJ/ton motor-

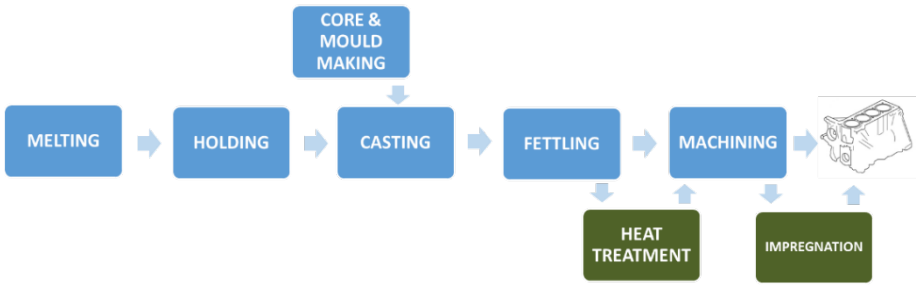
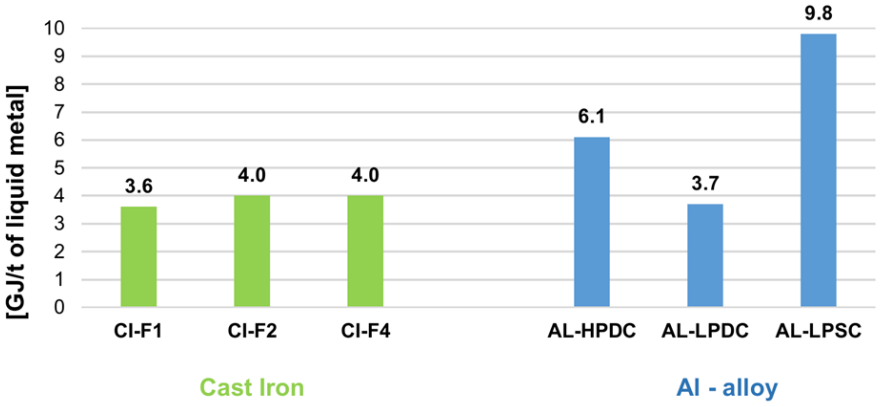
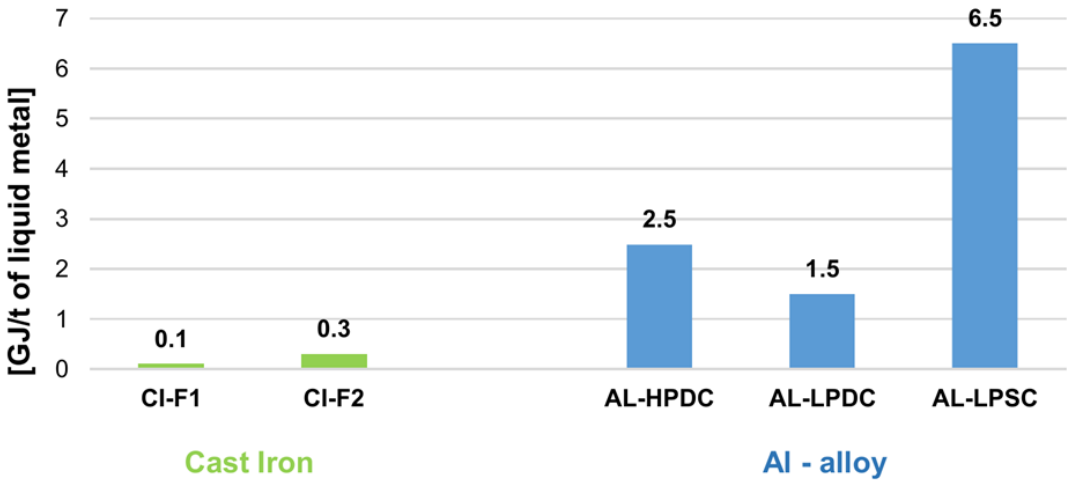


Fig. 6: Fremstillingsfaserne i et støberi fra smeltning til færdig motorblok



Figur 7: Smelteenergi registreret i 3 jern- og 3 aluminiumstøberier. De interviewede jernstøberier brugte kupolovne og har næste samme energiniveau. Aluminiumsstøberierne anvendte forskellige smeltemetoder og udviste meget større variation.



Figur 8: Holdetidens energiforbrug hos forskellige støberier.

blok, afhængig af de anvendte processer. Derudover er der også et energiforbrug til regenerering at kerne- og formsandet. For kernesand blev energiforbruget beregnet til 1,8 GJ/t og for formsand (vådsand) 0,2 GJ/t.

Denne undersøgelse har ikke medtaget de energiforbrug, der er forbundet med fremstilling af kokiller til HPDC eller LPDC, da kokiller anvendes så mange gange at energiandelen pr. støbning bliver ubetydeligt. Figur 5 viser materialernes gruppeopdelte energiforbrug.

Energibehov til de forskellige fremstillingsfaser af motorblokke

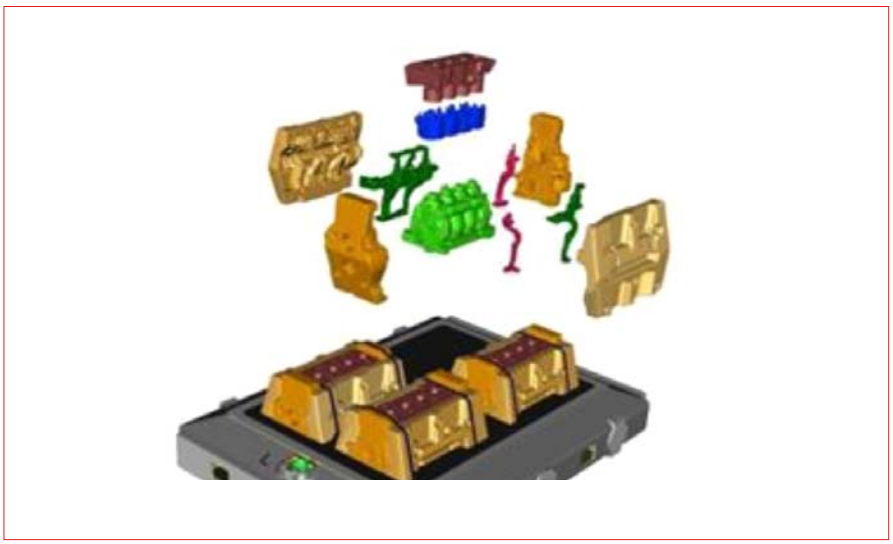
Selv om alle motorblokke bliver fremstillet i et støberi, er der forskel på, om de fremstilles i jern eller i en af de 3 aluminiumslegeringer. Fremstillingsfaserne er vist skematisk i fig. 6.

Smeltning, holdetid, kerne- formfremstilling og støbning

Den teoretiske mængde energi nødvendigt for at smelte 1 ton af enten en aluminiumlegering eller støbejern med ca. 100 ° C overhedning er ca. 1 GJ [12] [13]. Der er dog ikke mange smelteovne, der er mere end 50% effektive. Desuden er udbyttet for de fleste aluminiumsstøberier ca. 60-65%, dog kan der ved højtryks kokillestøbning opnås tæt på 70%. Jernstøberier kan opnå et udbytte på 75%. Med hensyntagen til disse generelle skøn kan man forvente, at mængden af energi / ton støbegods er af størrelsesordenen 2-3 GJ. Figur 7 viser tallene for smeltning af både støbejern og Al-legeringer fra de støberierne, der blev interviewet til denne undersøgelse.

Hos jernstøberierne var holdetiden generelt begrænset og energibehovet således ubetydeligt. Derimod var holdetiden i aluminiumsstøberier en væsentlig del af fremstillingsprocessen for at give mulighed til afgassning og rensning. LPS-støberiet brugte en særlig lang holdetid på op til 13 timer for at kunne udskille jernholdige urenheder. Figur 8 viser de forskellige holdetidsenergier, der er registreret i de medvirkende støberier.

Både jern- og aluminiumsstøberier har indberettet et smeltetab på 2 % under smelte- og holdeprocessen. LPS-industriens ekspert mente dog, at dette ikke ville være tilfældet for LPS, da metallet smeltes under en inert nitrogenatmosfære, og tabet ville således være meget lavere.



Figur 9: CAD-model af en typisk form og kerner til støbning af 4 motorblokke i en form

Det var ikke muligt at finde den virkelige værdi for LPS, og derfor blev det overvejet at anvende et metaltab på 2% for alle aluminiumstøberier, og det ændrer ikke signifikant på de energiværdier, der domineres af det meget høje energiforbrug under smeltning og holdetid.

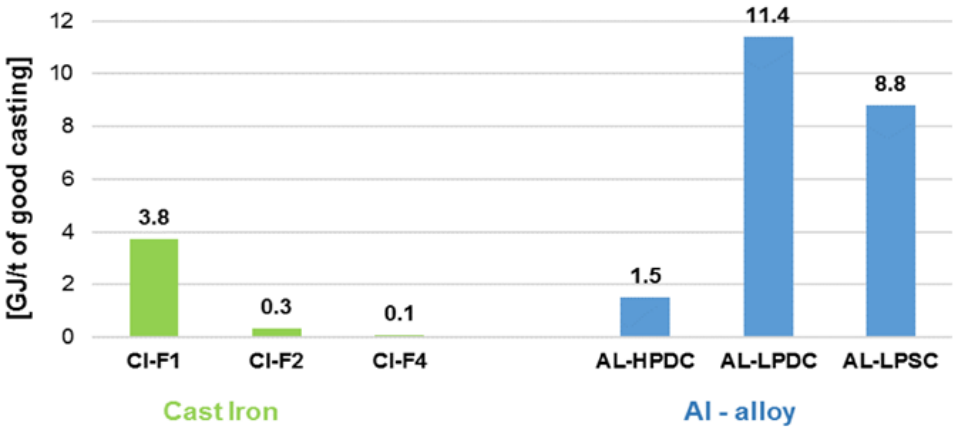
Til støbning af motorblokke anvendes kerner til at forme den komplekse indre geometri af blokken. Ved kokillestøbning i aluminium og sandstøbning i jern anvender de medvirkende støberier coldbox-kerner i kvartssand. Til højtrykstøbning kan disse kerner ikke anvendes, da højtryksindsprøjtningen af metallet ville ødelægge sandkernen. Kernernes vægte var forskellige støberierne imellem på grund af forskel i udformning. Kernevægten varierer også for de forskellige metaller. Det blev bemærket, at kernerne i LPDC-processen var relativt lette. For LPS er dette imidlertid ikke tilfældet, fordi i både LPS og støbjernsfremstilling medregnes hele sandmængden (kerner + form) (fig. 9). Energiforbruget til fremstilling af kerner varierede fra 0,5 til 1,5 GJ / t sand.

Energiforbruget under støbning hidrører sketransport, løftegrej, manipulatorer etc. Energiforbruget hos disse processer er dog ubetydeligt og medtages derfor ikke i denne undersøgelse.

Efterbehandlingsprocesser: rensning, varmebehandling, bearbejdning og imprægnering

Efterbehandlingsprocessen varierede afhængigt af metal- og støbeprocessen. En af de mest iøjefaldende forskelle mellem støbejern og aluminium var udbyttet. Motorblokkene i jern krævende ingen efterfødning men kun et indløbssystem. Derfor kunne der opnås et gennemsnitligt udbytte på 76% med kun ± 1% variation. Variationen på tværs af aluminiumstøberier var meget bredere lige fra 62% for LPS til 67% for HPDC. I de fleste tilfælde blev det fjernede indløbs- og efterfødersystem genanvendt internt med undtagelse af LPDC, hvor det blev sendt til sekundær oparbejdning hos en ekstern virksomhed. Renseenergien blev også undersøgt og bidrog med en forholdsvis lille værdi på ca. 0,5 GJ/t motorblok for både jern- og aluminiumstøberier.

For at opnå de ønskede mekaniske egenskaber af aluminiumslegeringer er varmebehandling en standardproces for at øge



Figur 10: Diverse energiforbrug hos de medvirkende støberier.

Tabel 1: Internt og eksternt vrag for al- og jernmotorblokke

Materiale	Støbeproces	Internt vrag (%)	Externt vrag (%)
Støbejern	Sandstøbning	3	0.5
Al-legering	LPDC	5 – 6.5	0.5
Al-legering	LPS	6 – 6.5	0.5
Al-legering	HPDC	5 – 8.5	0.5

Tabel 1: Internt og eksternt vrag for al- og jernmotorblokke

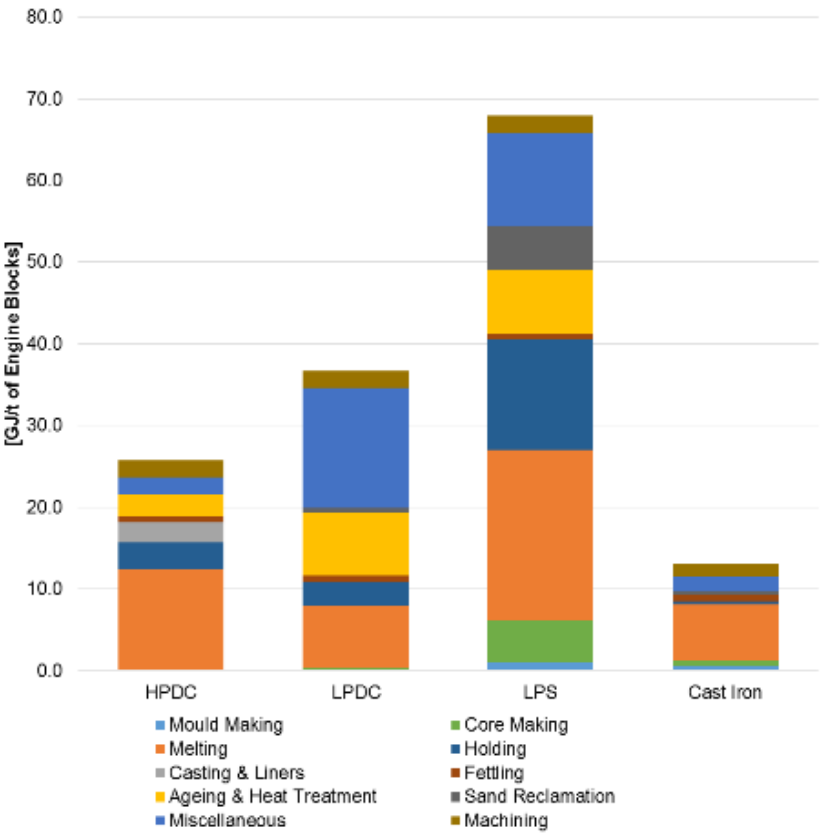
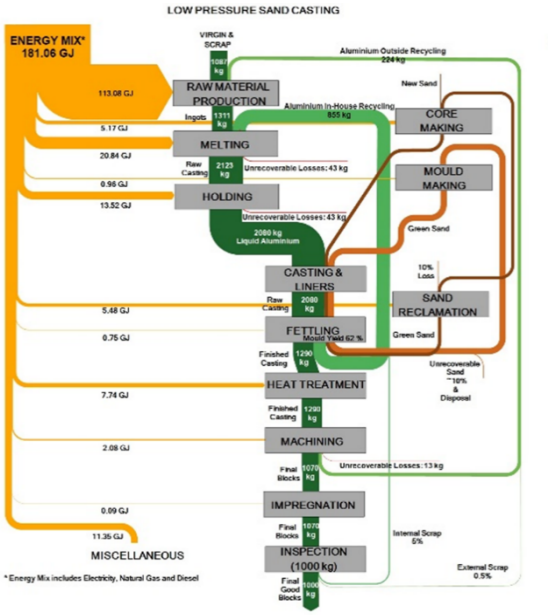
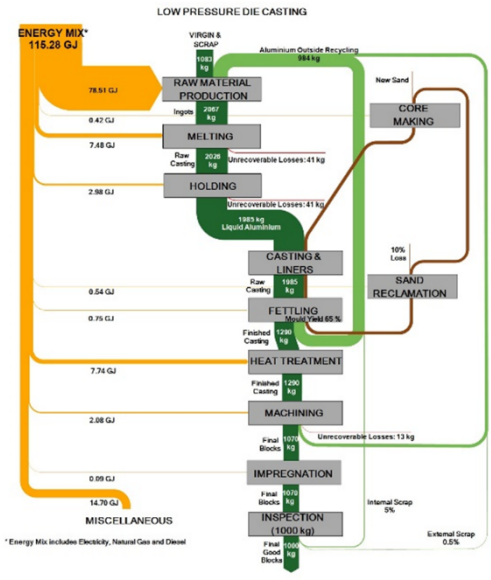


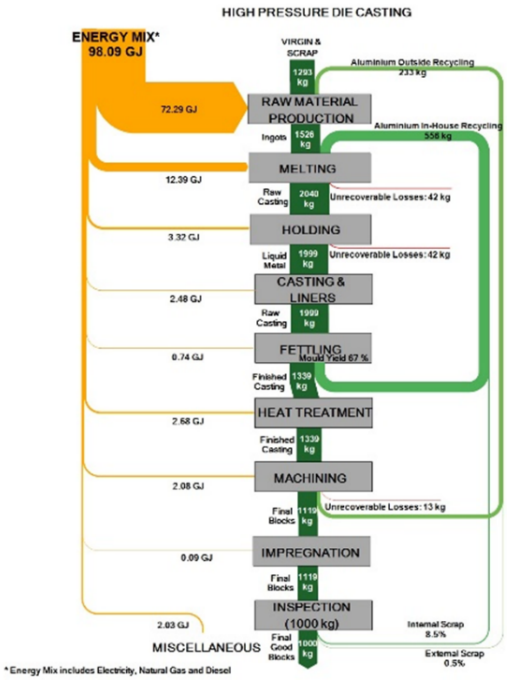
Fig. 11: Procesenergi/ton støbt motorblok



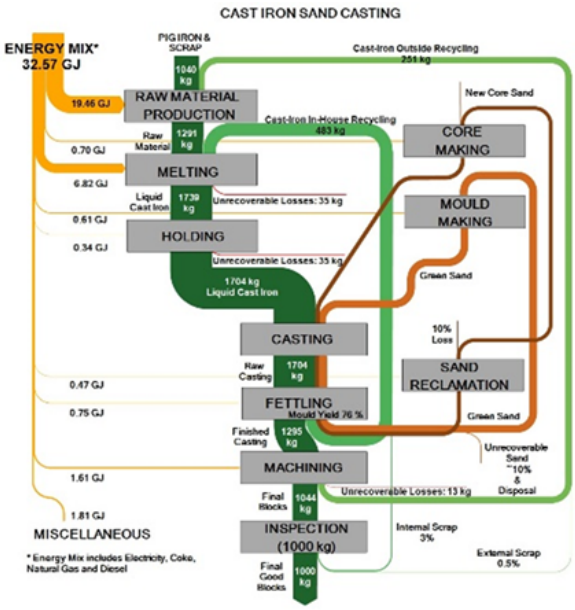
Figur 12: Sankey-diagram, der viser energi- og materialestrømme til lavtrykssandstøbning af Al-cylinderblokke. Driftsmaterialeeffektiviteten (udbytte) er 46% og procesenergiforbruget 181 GJ/t af støbegods



Figur 13: Sankey-diagram, der viser energi- og materialestrømme til lavtrykstøbning af Al-cylinderblokke. Driftsmaterialeeffektiviteten (udbytte) er 48% og procesenergiforbruget 115 GJ/t af støbegods



Figur 14: Sankey-diagram, der viser energi- og materialestrømme til højtrykstøbning af Al-cylinderblokke. Driftsmaterialeeffektiviteten (udbytte) er 48% og procesenergiforbruget 98 GJ/t af støbegods



Figur 15: Sankey-diagram, der viser energi- og materialestrømme til sandstøbning af støbejernscylinderblokke. Driftsmaterialeeffektiviteten (udbytte) er 55% og procesenergiforbruget 33 GJ/t af støbegods

styrken og forbedre duktiliteten af godset. Dette indebærer normalt opvarmning til en temperatur lige under smeltepunktet ved ca. 550 °C for op til 5 timer afhængigt godsets maksimale tykkelse. Normalt benævnes varmebehandlingen T6 eller T7, afhængig af modningstemperaturen og -tiden. Komponenten bratkøles derefter i et vand-, olie- eller vand/polymerbad og modes ved en temperatur, der sædvanligvis er tæt på 200°C. Det er ikke sædvanligt at HPDC-komponenter får denne behandling, men ofte udføres en afspændingsglødning, som udføres ved lavere temperatur og kortere tid (ca. 200 °C i 2 timer)..

Både teoretiske beregninger og interviews med varmebehandlingsvirksomheder indikerer at T6/T7 behandlinger kræver 3,2 - 6,1 GJ/t færdigstøbt motorblok. LPS-støberiet anvendte en T5-behandling, hvor emnet blev varmebehandlet direkte efter støbning uden afkøling til stuetemperatur. Varmebehandlingen blev brugt til termisk nedbrydning af formen og kerner på samme tid, og motorblokken blev efterfølgende modnet. Da motorblokken ikke opvarmes til modningstemperatur bruger denne proces betydeligt mindre energi, ca 1 og 2 GJ / t. Støbejerns motorblokke behøver ikke en varmebehandling.

Bearbejdning udføres på alle motorblokke. Cylinderudboringer, pakflader, krumtapsakseludboringer etc. bliver støbt med op til 3 mm bearbejdningstillæg. Et stort antal huller skal bores til oliekanaler og boltehuller. Bearbejdning omfatter alle de processer, hvor dette overskydende materiale fjernes for at opnå dimensionsnøjagtighed og overfladefinish i henhold til motordesignspecifikationerne.

Bearbejdningens energiforbrug kan variere alt efter de anvendte bearbejdningsparametre. Energien kan reduceres væsentligt ved at placere efterfødere og indløb på flader, som i forvejen skal bearbejdes. Ved hjælp af et software simuleringsværktøj leveret af MAG IAS var det muligt at estimere energiforbruget til bearbejdning ved forskellige processer og forskellige materialer. Dette værktøj angav, at for en 4 cylinder motorblok i aluminium, hvor 18% af blokken og 74% af de istøbte cylinderforingerne blev bearbejdet væk var energibehovet på ca. 2,1 GJ/t, mens for støbejernsblokken, hvor 20% af blokken fjernes, var energibehovet er ca. 1,6 GJ / t.

Den sidste efterbehandlingsproces er imprægnering med en polymerforbindelse for at forsegle overfladeporøsiteter. Dette udføres sædvanligvis ved en lavvakuumproces. Størstedelen af energien går til opvarmning af vand og polymer til 90°C og et

energibehov til vakuumpumper og andet ekstraudstyr. Imprægnering anvendes kun til Al-legeringer og anvendes normalt til HPDC. Nogle støberier rapporterede, at de imprægnerede 100% af alle cylinderblokke som en forebyggende foranstaltning. For at give et realistisk billede for aluminium blev det antaget i beregningerne, at kun 30% af aluminiumsmotorblokke er imprægneret.

Diverse energiforbrug

Diverse energiforbrug omfatter energi til processer som opvarmning, belysning etc. Energiforbruget for disse processer varierer meget hos de forskellige støberier, nemlig fra 9% til 36%. Årsagen til denne spredning skyldes, hvordan et støberi definerer sine processer. For eksempel medtager nogle støberier fremstillingsprocesser som pulverlakering eller maling af motorblokke under diverse energiforbrug. Figur 10 viser variationen i diverse energiforbrug hos de forskellige medvirkende støberier.

Vrag

Vrag påvirker materialernes effektive anvendelse og dermed energiindhold. Tabel 1 viser tallene for internt og eksternt vrag.

Oversigt energibehov til de forskellige fremstillingsfaser af motorblokke

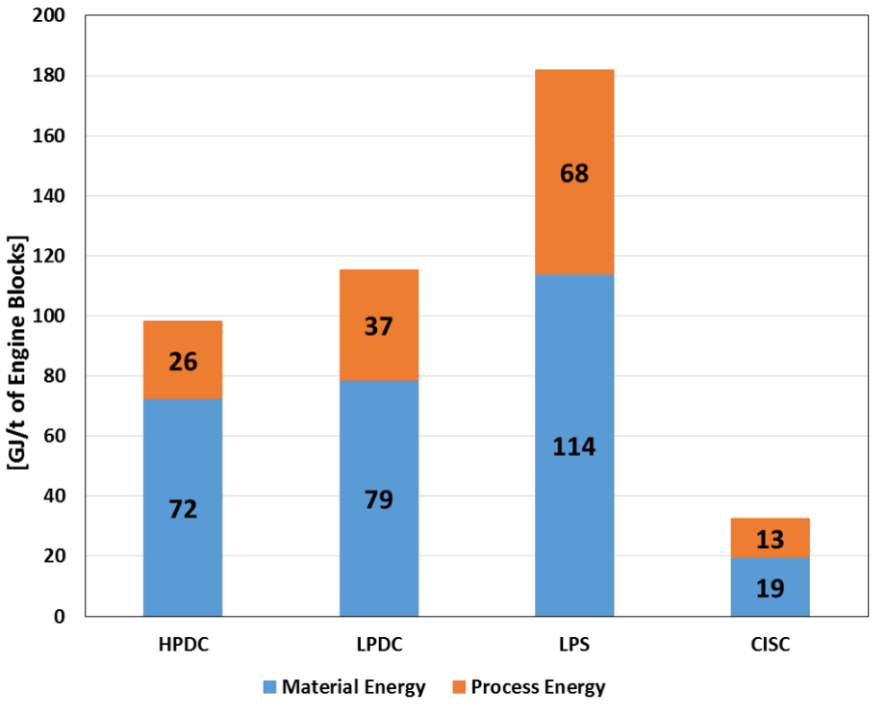
Fordeling af energibehovet for de forskellige procesenergier i de medvirkende støberier er vist i fig. 11.

Materiale- og energistrømsanalyse

Ved anvendelse af Sankey-procesdiagrammer anskueliggøres undersøgelsens materiale- og energistrømme i de forskellige typer støberier. Diagrammerne, fig 12-15, viser tydeligt, hvor mest energitilførsel, genanvendelse og materialetab finder sted. Sankey-diagrammer kan bruges til at vise virkningen af procesændringer for at give mulighed for procestilpasning og/eller -ændring. I analyserne anvendes en vægt på 200 kg for sand til kerner og forme til LPS-processen, mens støbejernsprocessen anvender en vægt på 181 kg for en kernepaket. En gennemsnitlig støbejernscylinderforing vejer ca. 1,75 kg.

Fig. 16 viser en sammenfatning af procesenergiforbruget [12] pr. ton støbegods for undersøgelsens forskellige støbeprocesser.

Artiklen fortsætter i STØBERIET nr. 4 – december 2019



Figur 16: Sammenfatning af procesenergiforbruget [12] pr. ton støbegods