

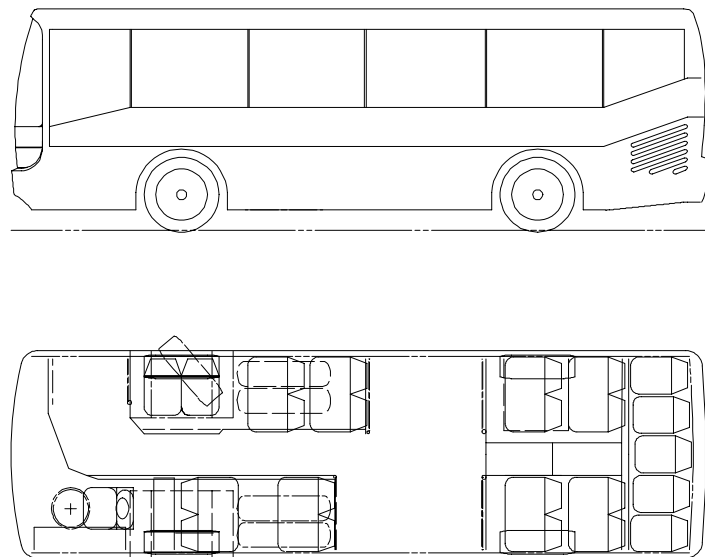
ELINKAARIARVIOINNIN KÄYTTÖ ECOBUSSIN SUUNNITTELUSSA

1. Ecobus-konsepti

ECOBUS[®] on 8,5 m pitkä midibussi, joka on tarkoitettu hoitamaan joukkoliikennettä reiteillä, joilla ei ole riittävästi matkustajia täyttämään suurta linja-autoa. Näin päästään mahdollisimman pieneen energian kulutukseen ja päästöihin matkustajaa kohti.

Pituus:	8,5 m
Leveys:	2,5 m
Korkeus:	2,85 m
Kokonaispaino:	11000 kg
Omapaino:	6500 kg
Istumapaikkoja:	24 (20-30)
Seisomapaikkoja:	20 (15-20)

Taulukko 1. Ecobussin tekniset tiedot.



Kuva 1. Ecobus sivulta ja päältä.

Linja-auton elinaikana kuluttamasta energiamäärästä käytetään noin 10% sen valmistamiseen, korjauksiin ja huoltoihin. Noin 90% energiasta kuluu polttoaineena linja-autoa käytettäessä. Myös hiilidioksidi- ja muiden päästöjen voi olettaa jakautuvan suunnilleen samassa suhteessa.

Auton käyttämä polttoaineteho P riippuu moottorin ja voimansiirron hyötysuhteesta η , ajovastuksesta ja ajonopeudesta v kaavan (1) mukaisesti.

$$(1) \quad P = \frac{1}{\eta} (m g f + m_r a + m g \sin \alpha + \frac{1}{2} \rho v^2 c_w A) v$$

Massasta m johtuvat vierintä-, kiihdytys- ja nousuvastus muodostavat yli 90% ajovastuksesta ja niillä on yhtä suuri vaikutus polttoaineen kulutukseen. Ilmanvastuksella on alle 10% osuudella varsin vähän merkitystä, varsinkin kaupunkiliikenteessä. Tärkeimmät tekijät ympäristöystävällistä linja-autoa suunniteltaessa ovatkin painon pienentäminen ja kuljetusvälineen mitoittaminen kuljetustarpeeseen soveltuvaksi, jolloin turhia kiloja ei mukana kuljeteta.

Painon lisäksi merkittävä tekijä polttoaineen kulutuksen pienentämisessä on koko voimansiirtoketjun, moottorista renkasiin, hyötysuhteen optimointi. Ecobussissa käytetään siksi esimerkiksi taka-akselilla kevyttä yksikkörengastusta ja mahdollisimman pienen vierintävastuksen omaavaa matalaprofiilirengasta.

2. Vähäpäästöiset moottorit

Ecobussin päämoottorivaihtoehtona on Valmet 620 DSI dieselmoottori, jolla CityDiesel-polttonesteellä ja hapettavalla katalysaattorilla päästään vuoden 1995 lopulla voimaan tulevien Euro II-päästörajojen alle. Dieselmoottorissa on myös mahdollista käyttää rypsiöljypohjaista polttonestettä, joka on uusiutuva luonnonvara.

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää Valmet 634 GA kaasumoottoria, jolloin päästään neste- tai maakaasu polttoaineena ja kolmitiekatalysaattoria käyttäen vielä pienempiin päästöihin. Kaasumoottori täyttää Kalifornian ULEV (Ultra Low Emission Vehicle)-vaatimukset.

Liikenteen hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää polttoaineen kulutusta pienentämällä sekä käyttämällä vähemmän hiiltä sisältäviä polttoaineita tai uusiutuvista luonnonvaroista valmistettua biopolttoainetta. Vaikka kaasukäyttöisen ottomoottorin kulutus on dieselmoottoria suurempi, jäävät hiilidioksidipäästöt maakaasulla dieselöljyä vähäisimmiksi kaasun pienemmän hiilipitoisuuden ansiosta. Nestekaasulla hiilidioksidipäästöt ovat samaa luokkaa dieselmoottorin kanssa.

	Teho [kW]	Kulutus [g/kWh]	Päästöt [g/kWh]			
			HC	CO	NOx	Part.
Valmet 620 DSI	110	203	0,2	0,3	7,0	0,15
Valmet 634 GA	125	239	0,3	0,4	2,5	0,05
Euro I			1,1	4,5	8,0	0,36
Euro II			1,1	4,0	7,0	0,15

Taulukko 2. Ecobussin moottorivaihtoehtojen tehot, kulutukset ja päästöt verrattuna nykyisiin ja tuleviin Euro-normeihin.

3. Energiatase materiaalivalinnassa

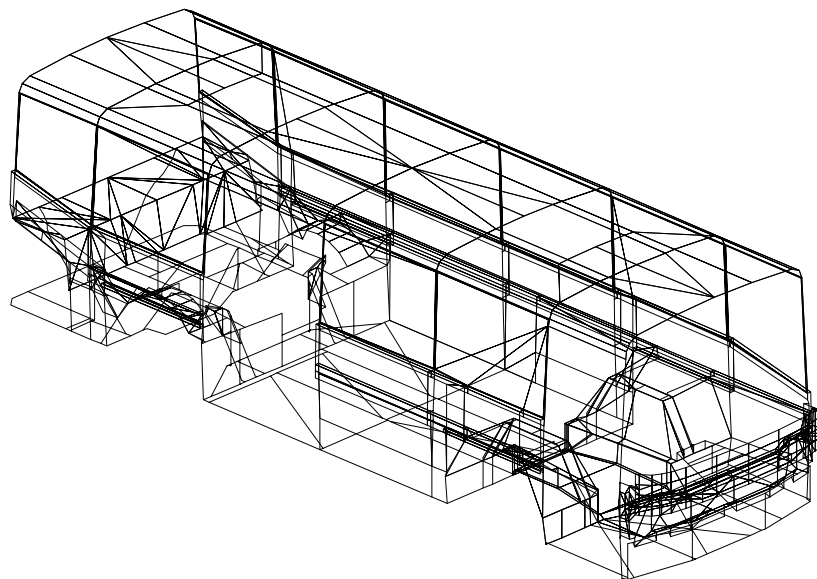
Koska hiilidioksidi- ja muiden päästöjen voi olettaa syntyvän energian kulutukseen verrannollisena, muodostaa energiataase, eli linja-auton koko elinikänä kuluttama energia käyttökelpoisen ja riittävän yksinkertaisen työkalun ympäristövaikutuksien huomioon ottamiseen materiaalivalinnassa. Koska paino on keskeisen tärkeä kuluneuvon energian kulutukseen vaikuttava tekijä, on se otettava myös materiaalivalinnassa huomioon jopa materiaalin kierrätettävyyttä tärkeämpänä tekijänä. Kierrätyksenkin kannalta pois jätetty materiaali on kaikkein paras.

Eri materiaaleista valmistettujen, saman muotoisten ja yhtä jäykkien tai lujien rakenteiden paino on verrannollinen materiaalin tiheyteen ja kimmomoduliin tai murtolujuuteen, joten alustavissa tarkasteluissa voidaan materiaaleja vertailla näiden ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi levyn taivutusjäykkyys on verrannollinen kimmomodulin ja levyn paksuuden kolmannen potenssin tuloon Et^3 . Koska osan tilavuus on verrannollinen levyn paksuuteen, on taivutusjäykkyyden mukaan mitoitettavan osan massa verrannollinen käytettävän materiaalin tiheyteen ja kimmomoduliin suhteessa $\rho/E^{1/3}$ [4]. Taulukkoon 3 on laskettu eri materiaaleista valmistettujen osien suhteelliset painot (teräs=100%), kun mitoitusperusteina ovat palkin ja levyn taivutusjäykkyys sekä palkin ja levyn taivutuslujuus.

	Tiheys ρ	E-moduli E	Murtolujuus σ	Taivutusjäykkyys		Taivutuslujuus	
				Palkki ρ/E	Levy $\rho/E^{1/3}$	Palkki ρ/σ	Levy $\rho/\sigma^{1/2}$
Teräs Fe52	7,85	206000	490	100%	100%	100%	100%
Alumiini	2,70	70000	300	101%	49%	56%	44%
Lasikuitulamin	1,54	11500	140	351%	51%	69%	37%
Hiilikuitulamin	1,42	44000	310	85%	30%	29%	23%
ABS	1,05	2200	45	1252%	61%	146%	44%
Ahlström RTC	1,07	4000	75	702%	51%	89%	35%

Taulukko 3. Eri materiaaleista valmistettujen palkin ja levyn taivutusjäykkyyden sekä palkin ja levyn taivutuslujuuden mukaan mitoitettujen osien suhteellinen paino.

Taulukon 3 perusteella teräs on varsinkin jäykkyyttä vaativissa palkkirakenteissa kilpailukykyinen. Lujuuden suhteen alumiini ja lujitemuovit ovat parhaita ja myös muut muovit tulevat kysymykseen levymäisissä rakenteissa. Hiilikuidun suosion syy ilmailu- ja avaruusteollisuudessa selvinnee myös taulukosta. Kevyeeseen rakenteeseen pääsemiseksi on siis käytettävä eri materiaalien parhaat ominaisuudet hyväksi, siksi myös Ecobussin valmistukseen on käytetty niin terästä, alumiinia kuin muovejakin. Kevyden lisäksi on otettava huomioon hyöty asiakkaalle, eli kuinka paljon kalliimpi kevyt rakenne saa olla.

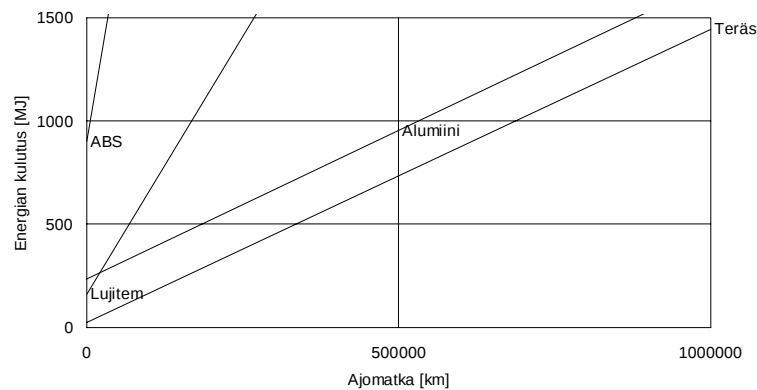


Kuva 2. Ecobussin itsekantavan korin FEM-malli.

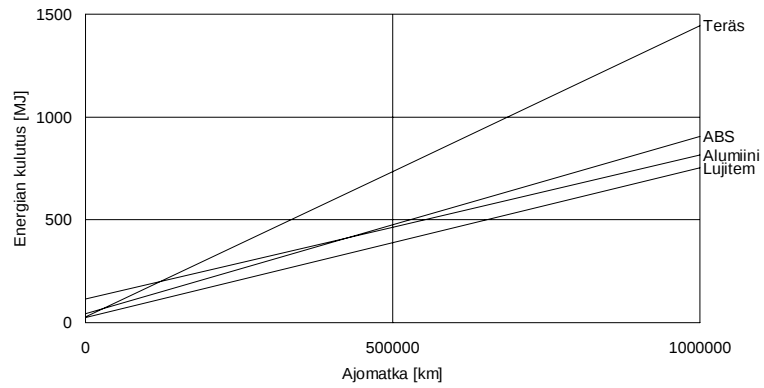
On muistettava, että taulukon 3 tulokset ovat lähinnä suuntaa antavia ja koskevat yhtä teoreettista kuormitustapausta. Todellisuudessa kuormitus on yleensä huomattavasti monimutkaisempi ja tarkempi laskenta on tehtävä FEM-menetelmän avulla iteroimalla eri materiaali- ja konstruktiovaihtoehdoilla.

Linja-autolla voi olettaa 1% painon pudotuksen laskevan myös polttoaineen kulutusta 1%, joka Ecobussilla vastaa 0,4 l/100km/100kg. Tämän lukuarvon, ajomatkan ja massan perusteella voidaan jokaiselle auton osalle laskea käytön aikainen kokonaisenergiankulutus. Esimerkiksi 1 kg painoinen osa aiheuttaa 1000000 km matkalla 40 l polttoaineen kulutuksen, joka vastaa 1420 MJ energiaa ja yli 100 kg hiilidioksidipäästöjä. Vastaavasti 1 kg painonsäästö pienentää vastaavan määrän energian kulutusta ja päästöjä.

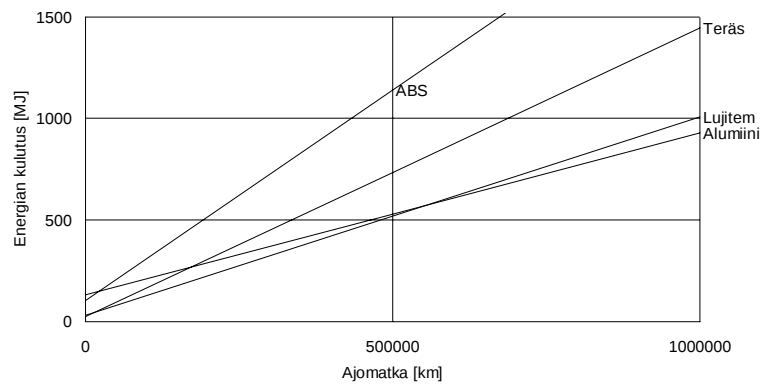
Kuvissa 3-6 on esitetty eri materiaaleista valmistettujen Ecobussin osien energiatase, kun vertailukohtana on 1 kg painoinen teräsosa. Suhteet säilyvät samana myös muun painoisille osille. Vertailu on tehty linja-auton rakennuksessa käytettyille yleisimmille materiaaleille: Teräkselle, alumiinille, ABS-kestomuoville ja lasikuidulla lujitetulle polyesterihartsikertamuoville. Jäykkyydeltään tai lujuudeltaan saman arvoisten osien vertailupaino saadaan taulukon 3 perusteella ja materiaalin sisältämä energiamäärä esimerkiksi lähteestä [6]. Laskussa on otettu huomioon vain raaka-aineen sisältämä energiamäärä, ei esimerkiksi osan valmistusta tai kierrätystä, joka pienentää alumiinin energiasisältöä 90%. Koska käytön aikainen energian kulutus on hallitseva, on järjestys useimmiten sama kuin taulukossa 3 oleva painojärjestys. Käytännön materiaalivalinnassa on otettava huomioon laskentatavan likimääräisyys, eikä valmistusteknisiä ja taloudellisia seikkojakaan voi unohtaa.



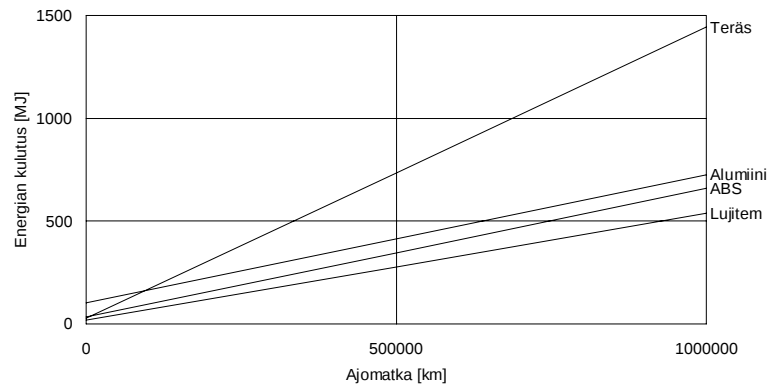
Kuva 3. Palkin taivutusjäykkyyden mukaan mitoitettun Ecobussin osan energiatase ajomatkan funktiona eri materiaaleille.



Kuva 4. Levyn taivutusjäykkyyden mukaan mitoitetun Ecobussin osan energiatase ajomatkan funktiona eri materiaaleille.



Kuva 5. Palkin taivutuslujuuden mukaan mitoitetun Ecobussin osan energiatase ajomatkan funktiona eri materiaaleille.



Kuva 6. Levyn taivutuslujuuden mukaan mitoitetun Ecobussin osan energiatase ajomatkan funktiona eri materiaaleille.

4. Kierrätysmyötäinen suunnittelu

Paras keino kierrätettävyyden parantamiseksi on suunnitella pitkäikäisiä ja helposti korjattavia tuotteita, jolloin kierrätettävää jätettä syntyy mahdollisimman vähän. Ecobussin suunniteltu kestoikä on 25 vuotta ja siinä on käytetty asennettavia moduulirakenteita, jotka voidaan niiden mahdollisesti rikkouduttua vaihtaa.

Moottori ja akselistot on suunniteltu helposti vaihdettaviksi ja moottorien peruskorjaukseen on Valmetilla jo olemassa toimiva järjestelmä. Peruskorjauksen yhteydessä voidaan moottorin päästöihin vaikuttavat komponentit vaihtaa uusimpia määräyksiä vastaaviksi.

Maalaus on ympäristöä rasittavaa ja se heikentää materiaalien, varsinkin muovien kierrätettävyyttä. Siksi Ecobussin osissa on pyritty käyttämään mahdollisimman paljon materiaaleja, jotka eivät vaadi maalausta.

Romutettavaksi tulevan linja-auton sisältämät materiaalit on saatava mahdollisimman lajipuhtaana erotettua kierrätykseen. Ecobussin osat on pyritty tekemään helposti irroitettaviksi ja mahdollisimman paljon on pyritty välttämään muovin liimausta ja muita ei purettavissa olevia liitosmenetelmiä. Varsinkin muovit tullaan merkitsemään ja auton purkamista varten laaditaan ohjeet. Myös eri nesteiden ja öljyjen tyhjentäminen sekä akkujen irroittaminen on pyritty tekemään mahdollisimman helpoksi.

Kierrätys on teräksen ja alumiinin osalta helpointa ja nykyisen laajassa määrin käytössä. Kestomuovien kierrätystä tuotantojätteellä käytetään jo varsin suuressa mitta-kaavassa, mutta käytettyjen osien materiaalin kierrätys on vielä alkuvaiheissa. Lujitemuovien kierrätysmenetelmät ovat vasta kehitysasteella.

Tässä esitelmässä on lähinnä käsitelty Ecobus-konseptin taustaa ja sen suunnittelu-vaiheessa käytettyjä työkaluja, laajempi elinkaarianalyysin laskenta on vielä käynnissä.

Lähteet:

- [1] Koivisto S., Kierrätys autoteollisuudessa, Koneensuunnittelun XVII kansallinen symposium, Tampere 1992, s. 61-65.
- [2] Koivisto S., Kierrätettävyys auton muoviosien suunnittelussa, Oy Saab-Valmet Ab, Uusikaupunki, 20.9.1993, 9 s.
- [3] Koivisto S., Kierrätettävyys autoteollisuuden materiaalivalinnoissa, AEL-INSKO R3213J/94 XVII, 6 s.
- [4] Haldenwanger H.-G., Vollrath L., Plastics in automotive engineering: materials, components, systems, Carl Hanser Verlag, 1994, VIII+276 s.
- [5] Mauch W., Kumulierter Energieaufwand von Lastkraftwagen, ATZ Automobil-technisches Zeitschrift 96(1994)2, s. 116-124.
- [6] Fussler C.R., Krummenacher B., Ecobalances: a key to better environmental material choices in automobile design, Materials&Design Vol.12 No.3 June 1991, s. 123-128.