

Transition pathways for the Belgian Industry: application to the case of the lime sector

Auteur : Mitraki, Rafailia

Promoteur(s) : Léonard, Grégoire

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil en chimie et science des matériaux, à finalité spécialisée en Chemical Engineering

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20254>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Transition pathways for the Belgian Industry: application to the case of the lime sector

By Rafailia MITRAKI

Supervisor: Grégoire LÉONARD

Thesis presented for obtaining the Master's degree in Chemical and Materials engineering

Academic Year: 2023-2024

Abstract

Faced with the climate emergency, it is crucial to reduce CO_2 emissions, which can be a complex task for hard-to-abate industries such as lime production. This thesis therefore, under the framework of the TRILATE project, aims to evaluate different energy transition pathways for the lime sector in Belgium. Lime is an essential product, used in a wide variety of applications: construction, steelmaking, effluent treatment, production of chemicals, etc. However, this sector is a major emitter of CO_2 , accounting for 1% of global anthropogenic emissions. The calcination reaction in lime kilns ($CaCO_3 + \text{heat} \rightleftharpoons CaO + CO_2$) alone generates $0.786 \text{ t}_{CO_2}/\text{t}_{\text{lime}}$ and takes place at very high temperatures (typically $900\text{--}1100^\circ\text{C}$), currently achieved by burning fossil fuels. Overall, between 1 and $1.8 \text{ t}_{CO_2}/\text{t}_{\text{lime}}$ are emitted depending on the considered kiln technology. The obtained quicklime can then be milled or hydrated ($CaO + H_2O \rightleftharpoons Ca(OH)_2 + \text{heat}$) to produce hydrated lime or milk of lime, depending on the amount of water added.

The objective of this study is to analyze various energy transition pathways for CO_2 emissions reduction in the lime sector. For this purpose, the Blueprint (BP) model of lime sector is developed, consisting of detailed mass and energy balances, as well as economic considerations (i.e., annualized CAPEX and OPEX). Moreover, all the possible emission-reduction pathways for lime production (i.e., fuel switching towards hydrogen, biogas, biomethane or solid biomass; electrification of kilns using plasma torches; CO_2 capture by chemical absorption with MEA or by oxycombustion) are included and a superstructure of pathways is developed. Furthermore, the OSMOSE Lua tool, developed at EPFL, is utilized for the evaluation of the superstructure of various alternatives for three different years (2030, 2040, 2050) and three different EnergyVille's scenarios (electrification, clean molecules, central). Finally, a comparison between all alternative lime production routes and the base case 'NG' (natural gas-fired lime kiln without CC) is performed on the basis of three key performance indicators: specific energy consumption ($\text{kWh}/\text{t}_{\text{lime}}$), specific CO_2 emissions ($\text{kg}_{CO_2}/\text{t}_{\text{lime}}$) and specific total cost ($\text{€}/\text{t}_{\text{lime}}$).

In 2030, the specific total cost of the base case is $\text{€}269\text{--}270/\text{t}$. The results indicate that the optimum energy transition pathways are 'Biomass-CC' and 'NGOxy-CC', resulting in a reduction in specific total cost (STC) of 27–28% and 16–18% compared to the base case, respectively, depending on the scenario considered. The CO_2 emissions reduction potential compared to the base case amounts to 115% for 'Biomass-CC' and 90% for 'NGOxy-CC'. 'Plasma-CC' comes 3rd, with a cost reduction of 12–18% and an emission reduction of 93% compared to a natural gas-fired kiln without CC. In 2040, firing a lime kiln with natural gas requires a specific total cost of $\text{€}370/\text{t}$. The economically optimal solution remains 'Biomass-CC' (49% lower STC than 'NG'), followed by 'Plasma-CC' (40–45% lower STC than 'NG', depending on the scenario). 'NGOxy-CC' and 'Biogas-CC' both achieve a STC reduction of 40–41%. Compared to the base case, 'Biogas-CC' configuration enables 124% lower CO_2 emissions. In 2050, the STC of 'NG' reaches $\text{€}476/\text{t}$. By implementing 'Biomass-CC', 'Biogas-CC', 'Plasma-CC' or 'NGOxy-CC', the specific total cost can be reduced by 60–61%, 53–54%, 51–62%, and 51–54% respectively, compared to 'NG'. The use of hydrogen in lime kilns, on the other hand, represents one of the most expensive transition pathways for the sector. Despite relatively low costs, the problems associated with biomass availability and the low TRL of plasma technology should not be overlooked.

This study provides a comprehensive analysis of a wide variety of energy transition pathways for the lime sector, however, there is still room for improvement. Future researches should focus on investigation of other CO_2 capture processes, use of more accurate economic data, consideration of acid gas removal prior to CO_2 capture, and inclusion of scope 2 CO_2 emissions.

Résumé

Face à l'urgence climatique, il est crucial de réduire les émissions de CO_2 , ce qui peut s'avérer complexe pour des industries difficiles à décarboner comme la production de chaux. Cette thèse, dans le cadre du projet TRILATE, vise donc à évaluer différentes voies de transition énergétique pour le secteur de la chaux en Belgique. La chaux est un produit essentiel, utilisé dans une grande variété d'applications : construction, sidérurgie, traitement des effluents, production de substances chimiques. Ce secteur est cependant un important émetteur de CO_2 , représentant 1% des émissions anthropiques mondiales. La réaction de calcination ($CaCO_3 + \text{chaleur} \rightleftharpoons CaO + CO_2$) génère à elle seule $0,786 \text{ t}_{CO_2}/\text{t}_{\text{chaux}}$. De plus, elle se déroule à de très hautes températures ($900\text{--}1100^\circ\text{C}$), actuellement atteintes par combustion de combustibles fossiles. Globalement, entre 1 et $1,8 \text{ t}_{CO_2}/\text{t}_{\text{chaux}}$ sont émises en fonction du type de four considéré. La chaux vive obtenue peut ensuite être broyée ou hydratée ($CaO + H_2O \rightleftharpoons Ca(OH)_2 + \text{chaleur}$) en chaux hydratée ou lait de chaux, en fonction de la quantité d'eau ajoutée.

L'objectif de cette étude est d'analyser différentes voies de transition énergétique permettant la réduction des émissions de CO_2 dans l'industrie de la chaux. Pour ce faire, le Blueprint (BP) du secteur de la chaux a été développé, comprenant des bilans de masse et d'énergie détaillés, ainsi que des considérations économiques (CAPEX et OPEX annualisés). En outre, toutes les voies possibles de réduction des émissions pour la production de chaux (c'est-à-dire l'utilisation d'hydrogène, de biogaz, de biométhane ou de biomasse solide ; l'électrification des fours à l'aide de torches à plasma ; la capture du CO_2 par absorption chimique avec la MEA ou par oxy-combustion) sont incluses et une superstructure de diverses voies de transition énergétique a été développée. Ensuite, l'outil OSMOSE Lua, développé à l'EPFL, est utilisé pour l'évaluation de la superstructure pour trois années différentes (2030, 2040, 2050) et trois scénarios différents d'EnergyVille (électrification, molécules propres, central). Enfin, une comparaison entre toutes les voies alternatives de production de chaux et le cas de base 'NG' (four à chaux alimenté au gaz naturel sans CC) est effectuée sur la base de trois indicateurs de performance clés : consommation d'énergie spécifique ($\text{kWh}/\text{t}_{\text{chaux}}$), émissions spécifiques de CO_2 ($\text{kg}_{CO_2}/\text{t}_{\text{chaux}}$) et coût total spécifique ($\text{€}/\text{t}_{\text{chaux}}$).

En 2030, le coût spécifique total du scénario de référence est de $269\text{--}270 \text{ €/t}$. Les résultats indiquent que les voies de transition optimales sont 'Biomass-CC' et 'NGOxy-CC', ce qui se traduit par une réduction du coût total spécifique (CTS) de respectivement $27\text{--}28\%$ et $16\text{--}18\%$ par rapport au cas de base, en fonction du scénario considéré. Le potentiel de réduction des émissions de CO_2 par rapport au cas de base s'élève à 115% pour 'Biomass-CC' et à 90% pour 'NGOxy-CC'. La configuration 'Plasma-CC' arrive en troisième position, avec une réduction des coûts de $12\text{--}18\%$ et une réduction des émissions de 93% par rapport à un four alimenté au gaz naturel sans CC. En 2040, un four à chaux alimenté au gaz naturel nécessite un coût total spécifique de 370 €/t . La solution optimale d'un point de vue économique reste 'Biomass-CC' (CTS 49% plus bas que pour 'NG'), qui est cette fois suivie par 'Plasma-CC' (CTS 40 à 45% inférieur à 'NG', selon le scénario). Les configurations 'NGOxy-CC' et 'Biogas-CC' atteignent toutes deux une réduction du CTS de 40 à 41% . Par rapport au cas de base, la configuration 'Biogas-CC' permet de réduire les émissions de CO_2 de 124% . En 2050, le CTS de la configuration 'NG' atteint 476 €/t . En mettant en oeuvre les configurations 'Biomass-CC', 'Biogas-CC', 'Plasma-CC' ou 'NGOxy-CC', le coût total spécifique peut être réduit de, respectivement, $60\text{--}61\%$, $53\text{--}54\%$, $51\text{--}62\%$ et $51\text{--}54\%$, par rapport à 'NG'. L'utilisation d'hydrogène dans les fours à chaux, en revanche, représente l'une des voies les plus coûteuses pour le secteur. Malgré des coûts relativement bas, les problèmes liés à la disponibilité de la biomasse et le faible TRL de la technologie plasma ne doivent pas être négligés.

Cette étude fournit une analyse d'une grande variété de voies de transition énergétique pour le secteur de la chaux, mais elle peut encore être améliorée. Les futures recherches devraient se concentrer sur l'étude d'autres processus de capture du CO_2 , l'utilisation de données économiques plus précises, la prise en compte de l'élimination des gaz acides avant la capture du CO_2 , et l'inclusion des émissions de CO_2 de scope 2.

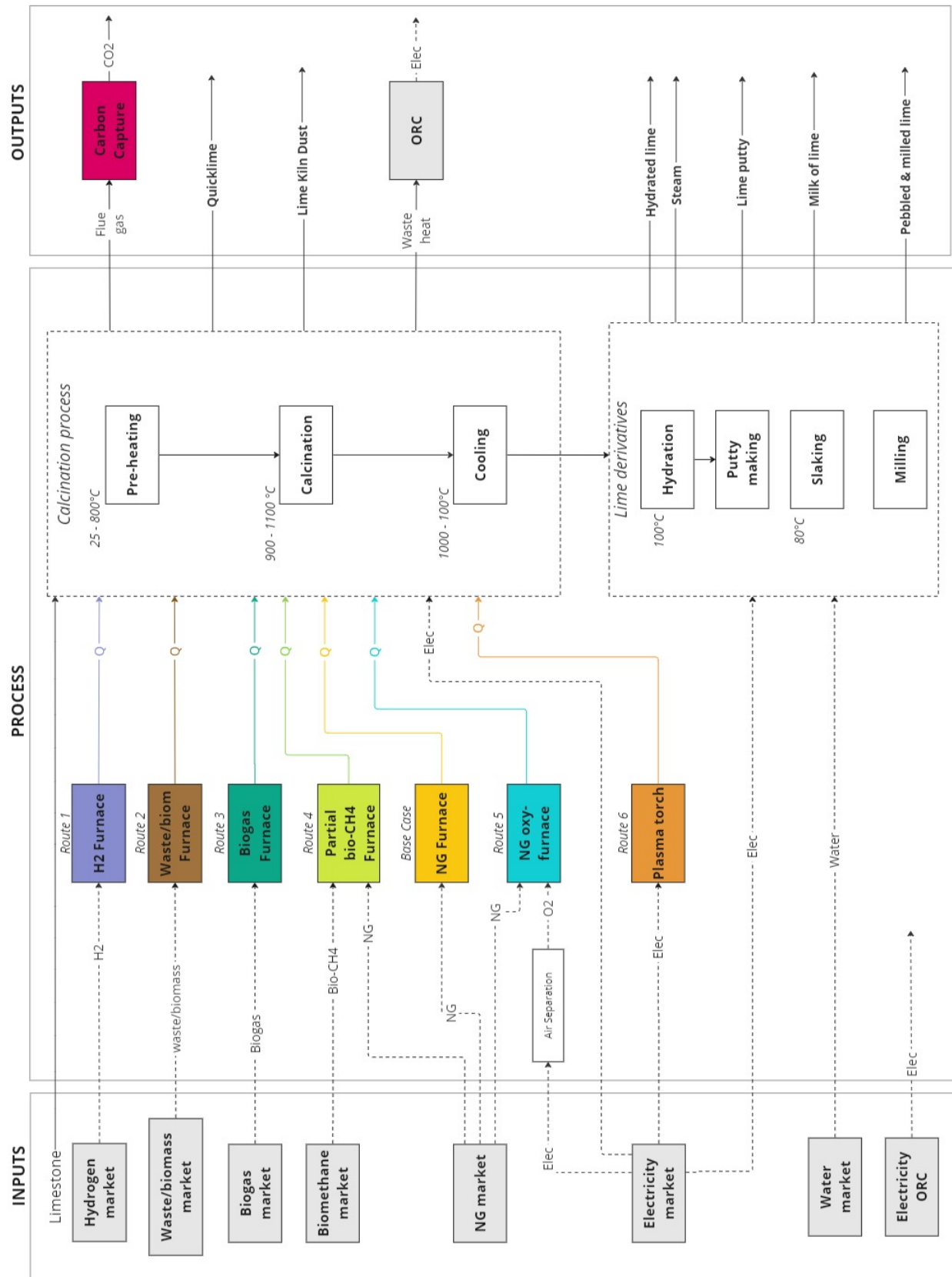


Figure 1: Superstructure of the lime sector

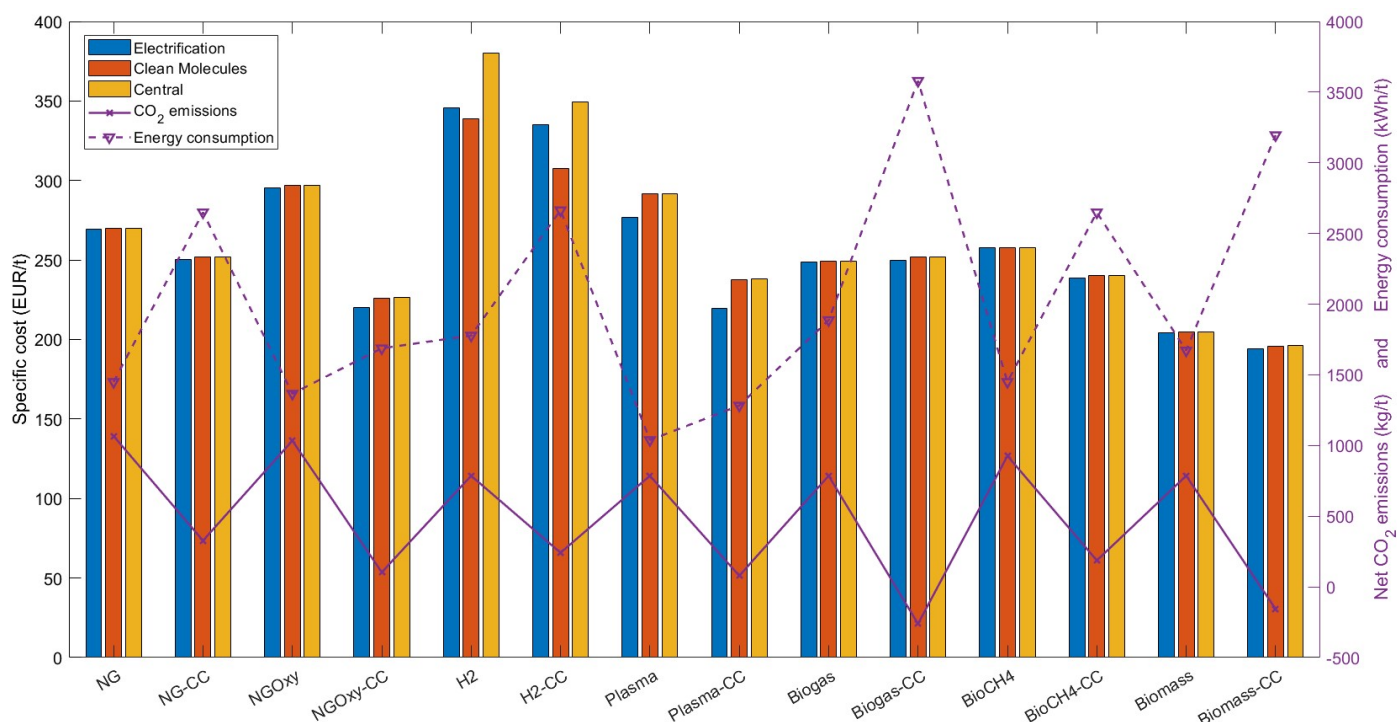


Figure 2: Specific total cost ($\text{€}/t_{\text{lime}}$), specific CO_2 emissions ($\text{kg}_{\text{CO}_2}/t_{\text{lime}}$) and specific energy requirement ($\text{kWh}/t_{\text{lime}}$) for different configurations in 2030

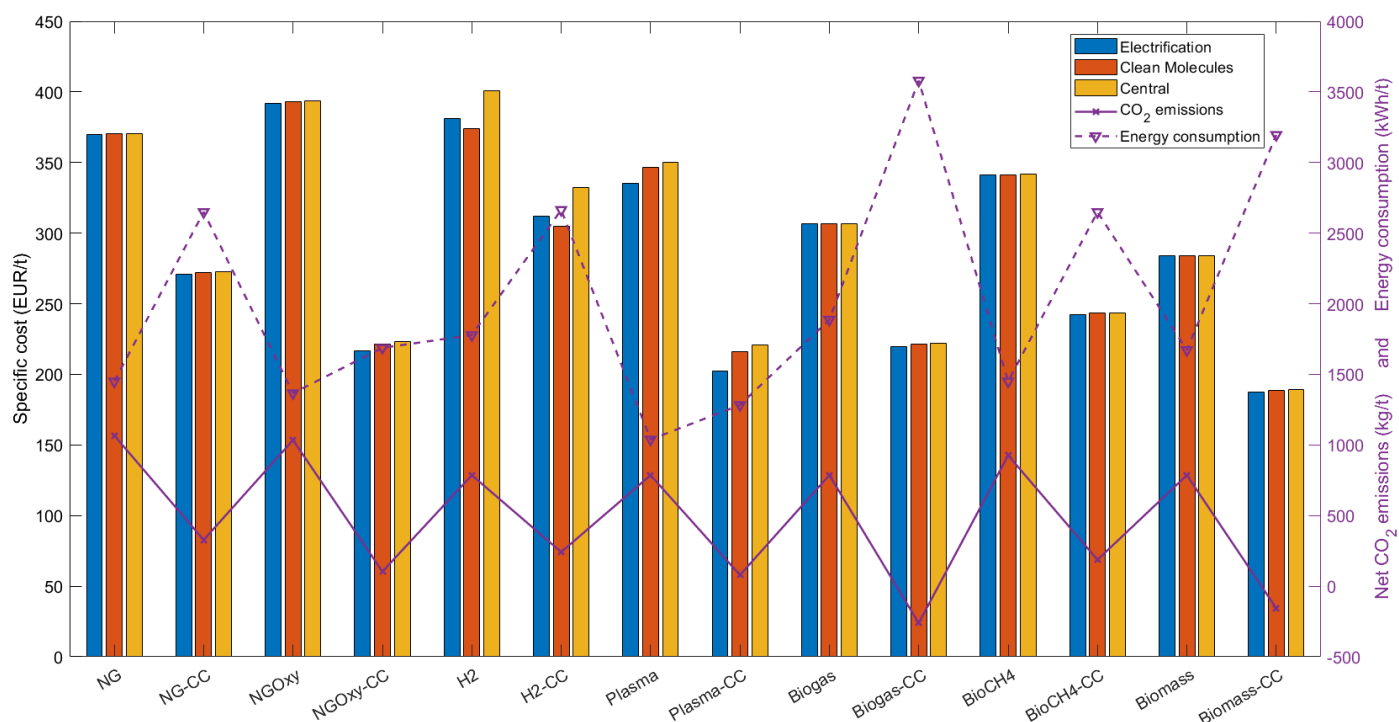


Figure 3: Specific total cost ($\text{€}/t_{\text{lime}}$), specific CO_2 emissions ($\text{kg}_{\text{CO}_2}/t_{\text{lime}}$) and specific energy requirement ($\text{kWh}/t_{\text{lime}}$) for different configurations in 2040

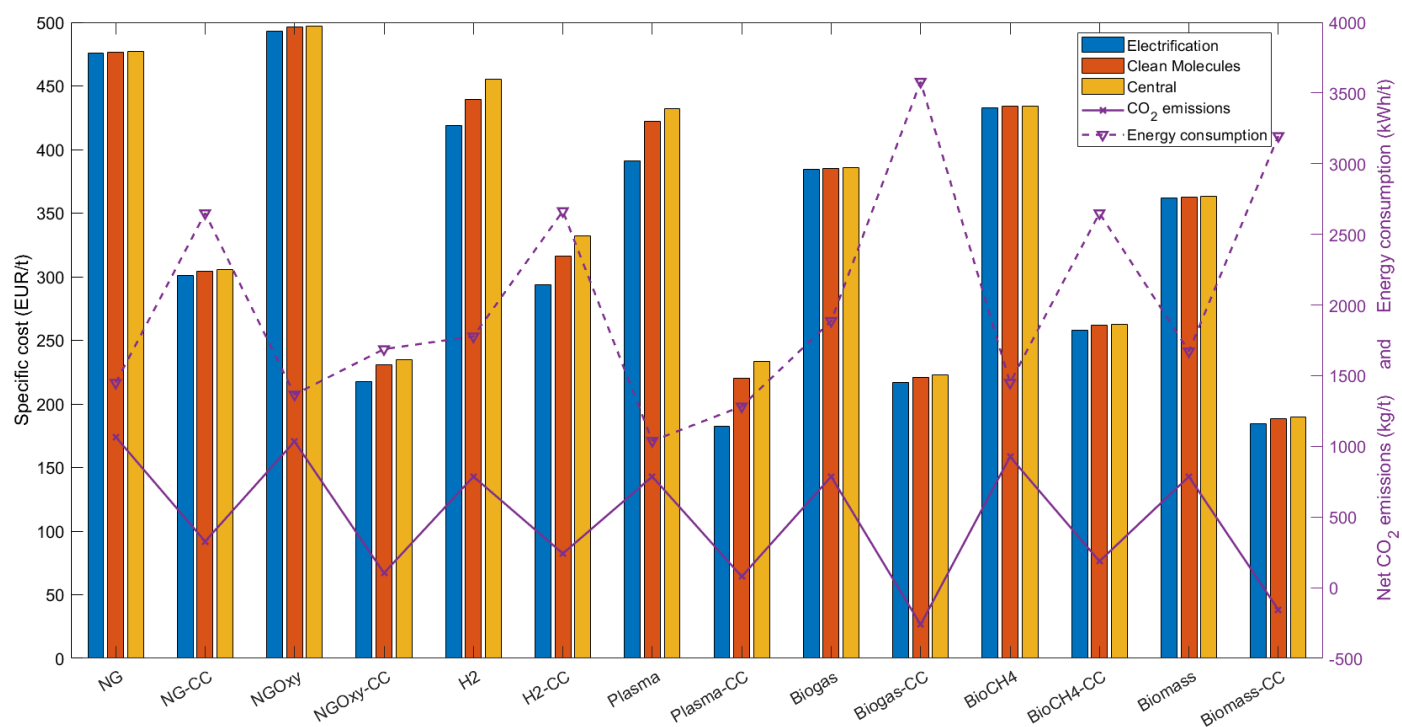


Figure 4: Specific total cost (€/t_{lime}), specific CO₂ emissions (kg_{CO₂}/t_{lime}) and specific energy requirement (kWh/t_{lime}) for different configurations in 2050