1. मॉड्यूल और इसकी संरचना

मॉड्यूल विस्तार	
विषय का नाम	जीव विज्ञान
पाठ्यक्रम का नाम	जीव विज्ञान 02 (कक्षा XI, छमाही-2)
मॉड्यूल का नाम / शीर्षक	पादपों में श्वसन: भाग – 2
मॉड्यूल आईडी	kebo_21402
पूर्व-अपेक्षित	कोशिकीय प्रक्रियायों का आधारभूत ज्ञान
उद्देश्य	इस पाठ का अध्ययन करने के पश्चात् शिक्षार्थी निम्न तथ्यों को समझने में सक्षम होंगे: • वायु श्वसन • पायरुवेट का ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण– ग्लाइकोलिसिस तथा क्रेब्स चक्र का सम्बन्ध • क्रेब्स चक्र के पद • इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला • ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण
मुख्य शब्द	वायु श्वसन, क्रेब्स चक्र, इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला, ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण

2. विकास दल

भूमिका	नाम	सम्बद्धता
राष्ट्रीय MOOC समन्वयक (NMC)	प्रो. अमरेंद्र पी बेहरा	सीआईईटी, एनसीईआरटी, नई दिल्ली
कार्यक्रम के समन्वयक	डॉ. मो. ममूर अली	सीआईईटी, एनसीईआरटी, नई दिल्ली
पाठ्यक्रम समन्वयक (सीसी) / पीआई	डॉ सुनीता फरक्या	डी.इ.एस.एम., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली
पाठ्यक्रम सह समन्वयक/ सह-पी.आई.	डॉ. यश पॉल शर्मा	सी.आइ.इ.टी., एन.सी.ई.आर.टी., नई दिल्ली
विषय वस्तु विशेषज्ञ	डॉ मधुमिता बनर्जी	रामजस कॉलेज, दिल्ली विश्वविद्यालय
समीक्षा दल	डॉ. अरुणा मोहन (सेवानिवृत)	गार्गी महाविद्यालय, दिल्ली विश्वविद्यालय
अनुवादक	हरिकृष्ण आर्य	प्राचार्य, माध्यमिक शिक्षा विभाग (राजस्थान सरकार)

विषय-सूची

1. वायुवीय श्वसन
2. पायरुवेट का ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण
3. क्रेब्स चक्र
4. इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला
5. ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण

1. वायुवीय श्वसन

वायुवीय श्वसन वह प्रक्रिया है जिसमें ऑक्सीजन की उपस्थिति में कार्बनिक पदार्थों का पूर्ण ऑक्सीकरण हो जाता है, तथा कार्बन-डाइऑक्साइड, जल एवं बहुत अधिक मात्रा में ऊर्जा, जो कि श्वसनीय क्रियाधार में संचित होती है, मुक्त होती है। जब श्वसनीय क्रियाधार ग्लूकोज होता है तब इस प्रक्रिया को निम्न प्रकार से प्रदर्शित किया जा सकता है।

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \xrightarrow{\text{Enzymes}} 6CO_2 + 6H_2O + 686 \text{ kcal/2870 kJ}$$

इस प्रकार का श्वसन उच्च जीवों में अधिक आम होता है।

इस प्रकार का श्वसन करने वाले जीवों को वायुजीवी अथवा ऑक्सीजीवी (Aerobes) कहा जाता है।

वायुवीय श्वसन दो चरणों में संपन्न होता है।

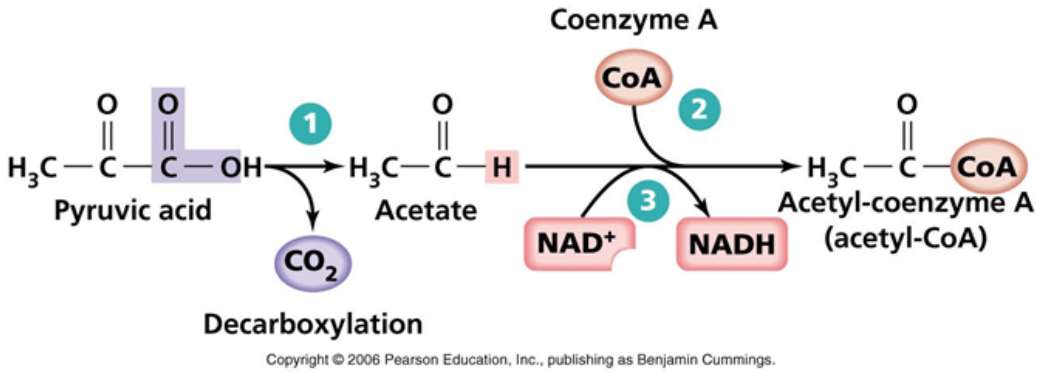
1. ग्लाइकोलिसिस के दौरान निर्मित पायरुवेट का ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण, जिससे ऐसीटाइल को एंजाइम ए उत्पन्न होता है तथा क्रेब्स चक्र द्वारा ऐसीटाइल को एंजाइम ए के अनुवृति चरणबद्ध ऑक्सीकरण द्वारा कार्बन-डाईऑक्साइड, एनएडीएच (NADH), ऍफ़एडीएच (FADH) तथा एटीपी (ATP) उत्पन्न होते हैं। ये क्रियाएँ माइटोकोंड्रियल आधात्री में संपन्न होती हैं।

2. इलेक्ट्रॉन्स का इलेक्ट्रान ग्राहियों की श्रृंखला से होता हुआ गमन आण्विक ऑक्सीजन के लिए इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला (माइटोकोंड्रिया की अंत: कला में स्थित) का निर्माण करता है, फलस्वरूप NAD और FAD का पुनर्निर्माण होता है तथा साथ ही साथ ATP का संश्लेषण होता है जो कि ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण से निर्मित होते हैं।

2. पायरुवेट का ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण

जब ऑक्सीजन उपस्थित होती है यानि वायुवीय परिस्थितियों में, ग्लाइकोसिसिस के अंतिम उत्पादन के रूप में साइटोसोल में उत्पन्न पायरुवेट का स्थानांतरण माइटोकोंड्रियल आधात्री में हो जाता है।

माइटोकोंड्रियल आधात्री में पायरुवेट का अभिक्रियाओं के एक जटिल समूह, जो कि पायरुविक डिहाइड्रोजिनेज से उत्प्रेरित होती हैं, के द्वारा ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण होता है। पायरुविक डिहाइड्रोजिनेज द्वारा उत्प्रेरित अभिक्रियाओं के लिए अनेक कारकों, जिनमें Mg आयन, थायमिन पायरोफॉस्फेट (TPP), लिपोलिक अम्ल, NAD+, तथा कोएंजाइम ए (CoA) सम्मिलित हैं, की भागीदारी की आवश्यकता होती है। यह अभिक्रिया निम्नानुसार होती है। (चित्र 1)



चित्र 1. पायरुविक अम्ल का ऑक्सीकारी डिकार्बोक्सीलिकरण

कार्बन-डाईऑक्साइड, एनएडीएच तथा ऐसीटाइल कोएंजाइम ए का निर्माण निम्नानुसार होता है।

1. पायरुवेट से एक कार्बोक्सिल समूह को हटा दिया जाता है और इसे कार्बन डाइऑक्साइड के रूप में मुक्त कर दिया जाता है।
2. प्रथम चरण के दो कार्बन अणु ऑक्सीकृत हो जाते हैं, तथा NAD+ इलेक्ट्रॉन्स ग्रहण कर NADH का निर्माण करता है।
3. दोनों ऑक्सीकृत कार्बन अणु तथा एक ऐसीटाइल समूह कोएंजाइम ए (CoA) के साथ जुड़कर ऐसीटाइल कोएंजाइम ए (Acetyl CoA) का निर्माण करते हैं।

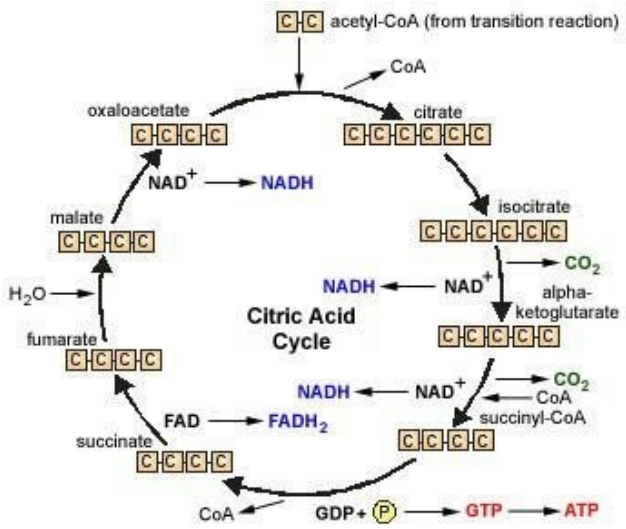
इसके पश्चात् ऐसीटाइल कोएंजाइम ए (Acetyl CoA) एक चक्रीय पथ में प्रवेश करता है जिसे ट्राईकार्बोक्सिलिक चक्र (TCA Cycle) कहते हैं। इसे सिट्रिक अम्ल चक्र (चक्र का प्रथम उत्पाद सिट्रिक अम्ल होने के कारण) अथवा इसको प्रथम बार विशद रूप से समझाने वाले वैज्ञानिक हैंस क्रेब्स के नाम पर क्रेब्स चक्र (Krebs Cycle) भी कहा जाता है।

ऐसीटाइल कोएंजाइम ए (Acetyl CoA) ग्लाइकोलिसिस तथा TCA चक्र के मध्य कड़ी बनाता है।

3. क्रेब्स चक्र/ TCA चक्र/ सिट्रिक अम्ल चक्र

सिट्रिक अम्ल चक्र (चित्र 2) की शुरुआत ऐसीटाइल समूह के ऑक्सेलो ऐसिटिक अम्ल (OAA) तथा जल के साथ संघनन से सिट्रिक अम्ल बनने से होती है। (चित्र 2) यह अभिक्रिया सिट्रेट सिंथेज एंजाइम से उत्प्रेरित होती है तथा इस अभिक्रिया में कोएंजाइम ए (CoA) का एक अणु मुक्त होता है।

सिट्रेट बाद में आइसोसिट्रेट में समायवित (Isomerised) हो जाता है। इसके पश्चात डिकार्बोक्सीलिकरण के दो क्रमिक चरण संपन्न होते हैं फलस्वरूप α-किटोग्लुटेरिक अम्ल तथा सक्सीनाइल को एंजाइम ए (Succinyl CoA) का निर्माण होता है।



चित्र 2: क्रेब्स चक्र/ TCA चक्र/ सिट्रिक अम्ल चक्र

सिट्रिक अम्ल चक्र के बचे हुए चरणों में सक्सीनाइल CoA ओक्सेलोऐसीटिक अम्ल (OAA) में ऑक्सीकृत होकर चक्र को आगे बढ़ाने में सहायक होता है। सक्सीनाइल CoA से सक्सीनिक अम्ल के रूपांतरण के दौरान जीटीपी (GTP) के एक अणु का निर्माण होता है। इसे क्रियाधार स्तरीय फॉस्फोरिलिकरण कहते हैं। इन युग्मित अभिक्रियाओं में जीटीपी, जीडीपी में रूपांतरित हो जाता है तथा एडीपी से एटीपी का निर्माण होता है।

चक्र में तीन बिंदु ऐसे होते हैं जिसमें NAD+ का NADH + H+ में अपचयन होता है और एक बिंदु पर FAD+ का FADH2 में अपयचन होता है।

टीसीए चक्र द्वारा ऐसीटाइल कोएंजाइम के निरंतर ऑक्सीकरण हेतु ऑक्सेलोऐसीटेट अम्ल के निरंतर पुन:पूर्ति की आवश्यकता होती है, जो चक्र का प्रथम सदस्य है।

इसके साथ-साथ NAD+ तथा FAD+ के क्रमश: NADH व FADH2 से पुन:उत्पादन की भी आवश्यकता होती है।

TCA चक्र में एक पायरुविक अम्ल अणु के पूर्ण ऑक्सीकरण का संक्षिप्त समीकरण निम्नवत होता है:

पायरुविक अम्ल + 4NAD+FAD+H2O + ADP+Pi= 3CO2 +4NADH +4H +FADH2 +ATP

क्योंकि ग्लाइकोलिसिस के दौरान ग्लूकोज के टूटने से दो पायरुविक अम्ल अणुओं का निर्माण होता है, अत: ग्लूकोज के एक अणु के विघटन से होने वाला कुल उत्पाद 6 अणु कार्बन डाइऑक्साइड, 8 अणु NADH, 2 अणु FADH2 तथा 2 अणु GTP का बना होता है।

4. इलेक्ट्रान परिवहन शृंखला

क्रेब्स चक्र के दौरान निर्मित NADH तथा FADH2 इलेक्ट्रान परिवहन शृंखला (Electron Transfer Chain) में प्रवेश करते हैं। इलेक्ट्रान परिवहन शृंखला NADH तथा FADH2 से ऑक्सीजन की ओर इलेक्ट्रॉन्स के प्रवाह को उत्प्रेरित करती है। इलेक्ट्रान परिवहन शृंखला का कार्य NADH तथा FADH2 का ऑक्सीकरण करना तथा इनसे NAD तथा FAD का पुनरुत्पादन कर इन अपचायकों के कोशिकीय पूल की पुन:पूर्ति करना है ताकि क्रेब्स चक्र क्रियाशील बना रह सके। NADH तथा FADH2 के ऑक्सीकरण से उत्पन्न मुक्त ऊर्जा माइटोकोंड्रिया की आंतरिक झिल्ली के पार एक विद्युतरासायनिक

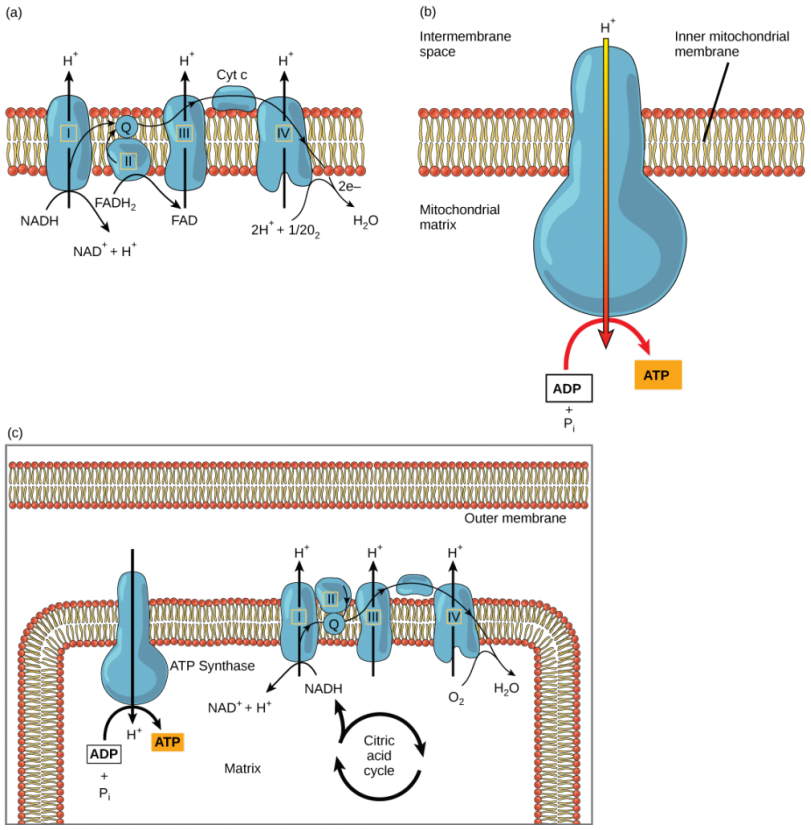
प्रोटोन प्रवणता उत्पन्न करने में प्रयुक्त होती है, जो कि जैसा हम देखेंगे ATP संश्लेषण के लिए आवश्यक होती है।

इलेक्ट्रान परिवहन तंत्र में चार इलेक्ट्रान परिवहन प्रोटीन होते हैं जो संगठित होकर चार कॉम्पलेक्स (कॉम्पलेक्स I से IV) तथा दो चल इलेक्ट्रान वाहक यूबिक्विनोन तथा साइटोक्रोम सी का निर्माण करते हैं (चित्र 3)। कॉम्पलेक्स IV एटीपी (ATP) संश्लेषण में सम्मिलित होता है (चित्र 3)।

कॉम्पलेक्स **I:** (NADH डिहाइड्रोजिनेज). TCA चक्र के दौरान माइटोकोंड्रियल आधात्री में निर्मित NADH का कॉम्पलेक्स I के द्वारा ऑक्सीकरण हो जाता है। कॉम्पलेक्स I NADH से यूबिक्विनोन को इलेक्ट्रॉन्स का स्थानांतरण करता है। यूबिक्विनोन किसी प्रोटीन से सम्बंधित नहीं होता तथा झिल्ली के आर-पार गमन कर सकता है। अपचयित यूबिक्विनोन कॉम्पलेक्स I से III तक से लिए गए इलेक्ट्रॉन्स वितरित करता है तथा इस प्रक्रिया में ऑक्सीकृत हो जाता है।

कॉम्पलेक्स **II:** (सक्सीनेट डिहाइड्रोजिनेज). TCA चक्र में सक्सीनेट से फ्यूमरेट में रूपांतरण के दौरान निर्मित FADH2 इस कॉम्पलेक्स के द्वारा ऑक्सीकृत हो जाता है। कॉम्पलेक्स II FADH2 से यूबिक्विनोन को इलेक्ट्रॉन्स स्थानांतरित करता है तथा अपचयित यूबिक्विनोन बारी से कॉम्पलेक्स को इलेक्ट्रॉन्स का स्थानांतरण कर देता है।

कॉम्पलेक्स **III:** (साइटोक्रोम bc1 कॉम्पलेक्स या साइटोक्रोम c रिडक्टेज). यह कॉम्पलेक्स अपचयित यूबिक्विनोन को ऑक्सीकृत करता है तथा साइटोक्रोम bc1 कॉम्पलेक्स से साइटोक्रोम c के द्वारा इलेक्ट्रॉन्स का स्थानांतरण करता है। साइटोक्रोम c झिल्ली के भीतर गतिशील होता है तथा कॉम्प्लेक्स III से कॉम्पलेक्स IV को इलेक्ट्रॉन्स का स्थानांतरण करता है।



चित्र 4: एटीपी संश्लेषण

3a. माइटोकोंड्रिया की आंतरिक झिल्ली में चार मल्टीप्रोटीन कॉम्प्लेक्सेस तथा दो चल वाहक (Q = यूबिक्विनोन तथा cyt c = साइटोक्रोम c).

3b. माइटोकोंड्रिया की आंतरिक झिल्ली में स्थित कॉम्पलेक्स V ATP संश्लेषण में रत

3c. माइटोकोंड्रिया की आंतरिक झिल्ली में इलेक्ट्रान परिवहन तंत्र का संगठन तथा माइटोकोंड्रियल आधात्री में ATP संश्लेषण (ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण)

कॉम्पलेक्स **IV:** (साइटोक्रोम c ऑक्सीडेज). कॉम्पलेक्स IV अंतिम ऑक्सीडेज है जो ऑक्सीजन अणु को दो जल के अणुओं में अपचयित कर चार इलेक्ट्रॉन्स उत्पन्न करता है। इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला में ऑक्सीजन अंतिम इलेक्ट्रान ग्राही है।

कॉम्पलेक्स **V:** यह काम्प्लेक्स दो प्रमुख घटकों से बना होता है, एक F0 से प्रदर्शित किया जाने वाला ट्रांसमेम्ब्रेन प्रोटोन चैनल तथा माइटोकोंड्रियल आधात्री में स्थित F1 से प्रदर्शित किया जाने वाला एक एंजाइमी (एंजाइमेटिक) डोमेन। ATP सिंथेज एंजाइम F1 से सम्बंधित होता है तथा ADP और P से ATP संश्लेषण का कार्य करता है।

इस प्रकार इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला में इलेक्ट्रॉन्स का गमन कॉम्पलेक्स V में ATP संश्लेषण को संयोजित करता है।

5. ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण

माइटोकोंड्रिया में ATP के संश्लेषण को ऑक्सीकारी फॉस्फोरिलिकरण कहा जाता है क्योकि यह ऑक्सीजन की खपत के साथ जुड़ा हुआ है (हम पूर्व में ही देख चुके हैं कि इलेक्ट्रान परिवहन श्रृंखला में ऑक्सीजन अंतिम इलेक्ट्रान ग्राही होती है)।

माइटोकोंड्रिया में इलेक्ट्रान परिवहन के दौरान प्रोटोनों को माइटोकोंड्रियल आधात्री से बाहर कर माइटोकोंड्रिया की भीतरी और बाहरी झिल्ली के बीच स्थित अंतर कला स्थल (Inter Membrane Space) में डाल दिया जाता है (चित्र 3c)। प्रोटोनों का निष्कासन कॉम्पलेक्स I, III और IV से सम्पर्कित तीन स्थानों पर होता है। अंतर कला स्थल में प्रोटोनों के संचय से आंतरिक झिल्ली के पार प्रोटोन असंतुलन उत्पन्न हो जाता है। यह झिल्ली के पार एक प्रोटोन प्रेरक बल (Proton Motive Force) उत्पन्न करता है। ATP संश्लेषण का संचालन माइटोकोंड्रियल आधात्री में समाकलित कला प्रोटीन कॉम्पलेक्स (Integral Membrane Protein Complex), जिसे ATP सिंथेज/ युग्मन कारक (Coupling Factor)/ F0-F1 – ATPase कहा जाता है (इलेक्ट्रान परिवहन तंत्र में कॉम्पलेक्स V के नाम से संदर्भित), के माध्यम से प्रोटोनों की वापसी द्वारा होता है।

पीटर मिचेल ने सर्वप्रथम प्रस्तावित किया था कि किसी झिल्ली के पार स्थापित प्रोटोन प्रेरक बल श्वसन के दौरान ATP निर्माण के लिए उत्तरदायी होता है। इसे ATP निर्माण की रसोपरासरण सिद्धांत (केमियोओस्मोटिक थ्योरी) नाम से जाना जाता है।

आगामी मोडचूल में हम ग्लूकोज अणु के ऑक्सीकरण से उत्पन्न ATP अणुओं की संख्या का आकलन करने का प्रयास करेंगे।