أستاذ المادة : أ.م.د. آمال كاظم غضبان

البروتين الأحادي الخليـة
Single cell protein

يستعمل مصطلح البروتين الأحادي الخلية (SCP) للدلالة على الخلايا الجافة للأحياء المجهرية مثل الطحالب والبكتريا والبكتريا الخيطية والأعفان والفطريات الراقية التي تنمى في أنظمة مزرعية وعلى نطاق تجاري لاستعمالها مصدراً للبروتين في تغذية الإنسان والحيوان. وبالرغم من المحتوى العالي للبروتين في تلك الكائنات إلا إنها تحتوي على الكاربوهيدرات والدهون والفيتامينات والأملاح المعدنية إضافة إلى المواد النتروجينية غير البروتينية مثل الأحماض النووية.

استخدمت الأحياء المجهرية منذ الأزمنة القديمة سواء في الحضارات الشرقية أم الغربية في تغذية الانسان والحيوان مثل الطحالب التابعة لجنس Spirulina ، حيث كانت تجمع من البرك من قبل أقوام الازتك القديمة في المكسيك كمصدر للبروتين ولاتزال تؤكل خلايا هذا الطحلب لغاية اليوم من قبل شعوب منطقة تشاد Chad في افريقيا.

إن أول إنتاج لهذا البروتين على مستوى صناعي واستخدم في التغذية كان في ألمانيا خلال الحرب العالمية ألاولى حيث تمت تنمية خميرة *Saccharomyces cerevisiae* وباستخدام المولاس كمصدر للكاربون والطاقة واملاح الأمونيوم. وبذلك استطاعت ألمانيا أن تستغني عن حوالي 60%من الأغذية المستوردة قبل الحرب، أما خلال الحرب العالمية الثانية فقد استخدمت ألمانيا أيضاً خميرة التوريولا *Candida utilis* كمصدر للبروتين في التغذية وذلك بتنميتها على السائل المتخلف من مصانع الورق وعلى السكريات الناتجة من التحلل الحامضي للخشب، حيث انتجت حوالي 15 ألف طن بالسنة خلال الحرب العالمية الثانية وكان الاستخدام الرئيسي لهذه الخميرة هو إضافته للأغذية خاصة الشوربات Soups وانشر انتاج البروتين من هذه الخميرة بعد الحرب العالمية الثانية إلى بقية أنحاء العالم لحد الآن لاستخدامها في تغذية الانسان والحيوان .

طورت بعض شركات البترول في ستينيات القرن الماضي عمليات صناعية لتنمية الأحياء المجهرية على البترول ومشتقاته لإنتاج بروتين أحادي الخلية فقد تمت تنمية خميرة *Candida lipolytica* على الألكانات. ونتيجة للتطور الذي حصل في السنوات الأخيرة والخاص بوراثة وفسلجة الأحياء المجهرية فقد تم تحسين إنتاج البروتين الأحادي الخلية خاصة فيما يتعلق باستخدام أنواع متعددة من الاحياء المجهرية وباستخدام طيف واسع من المواد الخام مثل انتاج كتلة حيوية بكتيرية ذات محتوى عال من البروتين يصل الى 72% أو أكثر وبصورة مستمرة وباستخدام الميثانول كمادة خام وكذلك إنتاج خمائر خاصة في تغذية الإنسان ذات تراكيز عالية وبذلك يتم تقليل كلفة الطاقة المستخدمة في التجفيف.

الأحياء المجهرية المستخدمة في إنتاج البروتين الأحادي الخلية

يجب أن تتوفر صفات معينة في الأحياء المجهرية التي تستخدم في إنتاج البروتين الأحادي الخلية لاستخدامه في تغذية الانسان أو الحيوان، وأهم هذه الصفات هي :

1- لا تسبب أمراضا للنبات أو الحيوان أو الانسان.
2- ذات قيمة تغذوية جيدة.
3- غياب المركبات السامة.
4- ذات كلفة إنتاج واطئة. وتعتمد كلفة الإنتاج على بعض العوامل مثل معدل النمو و المحتوى البروتيني و الحاجة الى العناصر الغذائية المدعمة واستخدام أوساط غذائية انتقائية و عملية الفصل و التجفيف.

من الأحياء التي تستخدم في إنتاج البروتين الأحادي الخلية هي :

1- الطحـالـب Algae

معظم الطحالب التي تستخدم في انتاج هذا البروتين تعود الى جنس *Chlorella* وجنس *Scenedesmus* وجنس *Spirulina* . تتم تنمية الطحالب أما عن طريق التغذية الذاتية أي بالتركيب الضوئي (استخدام الكاربون ومصادر الكاربون غير العضوية) أو بالتغذية العضوية (استخدام مركبات الكاربون العضوية كمصدر للكاربون والطاقة). وتعد طريقة التركيب الضوئي هي الأكثر استعمالاً لذا يعد الضوء العامل المحدد في عملية الانتاج على النطاق التجاري. الطريقة المثلى لإنتاج الكتلة الحيوية للطحالب بوصفها مصدراً للبروتين هي استعمال البرك المفتوحة وبوجود ضوء الشمس، إلا أن مشكلة التلوث تعد من أهم المشاكل حيث لا يمكن المحافظة على ظروف التعقيم وبكلفة معقولة في ظل هذا النظام، أما المشكلة الاخرى فهي الكثافة الواطئة للخلايا أي تتراوح 1-2 غم من المادة الجافة لكل لتر من وسط الانتاج على النطاق التجاري لذا تتطلب العملية استخدام مساحات واسعة من المسطحات المائية. تصل نسبة البروتين في الطحالب الى حوالي 60% وذو محتوى جيد من الاحماض الامينية بالرغم من انخفاض نسبة الاحماض الامينية الحاوية على الكبريت، كما تحتوي الطحالب على كمية عالية من الصبغات الخاصة بالتركيب الضوئي والتي تعد مرغوبة في تحضير الأعلاف المركبة ولكنها غير مرغوبة في حالة استخدامها للاستهلاك البشري. وقد أظهرت الدراسات الخاصة في تغذية حيوانات مختلفة أن إضافة الطحالب الدقيقة micro algae كمصدر بروتيني لعليقة الحيوان أعطت نتائج جيدة بشرط استخدامها بنسب غير عالية جداً. أما استخدام طحالب *Scenedesmus* و *Chlorella* في تغذية الانسان فقد بينت الأبحاث حدوث مشاكل تغذوية إلا أن طحلب *Spirulina* يبدو أكثر ملائمة للاستهلاك البشري.

2- البكتـــريا Bacteria

يفضل استعمال البكتريا في إنتاج البروتين الأحادي الخلية نظراً لأن معدلات نموها عالية مقارنة بالأحياء المجهرية الأخرى. يعد عدد أنواع البكتريا المستعمل في إنتاج البروتين الأحادي الخلية كبيراً نوعاً ما نظراً لقابليتها على استخدام طيف واسع من المواد الخاضعة ويجب الحفاظ على ظروف التعقيم خلال عملية الانتاج وذلك لأن أغلب العمليات يتم ضبط الرقم الهيدروجيني pH 5- 7 مما يتيح مجال للتلوث بالبكتريا المرضية كما أن عملية فصل الخلايا بالطرد المركزي لا تخلو من المشاكل لذا فمن الضروري استعمال طرق محسنة لعمليات إنتاج البروتين من البكتريا. يمتاز البروتين المنتج من البكتريا بأنه عالٍ اي يبلغ المحتوى البروتيني أكثر من 80% ومحتواه من الاحماض النووية خاصة **RNA** عالٍ جداً يصل إلى 20% لذا يجب إجراء بعض المعاملات على هذا البروتين لخفض نسبة الأحماض النووية قبل استخدامه في التغذية. كما أن محتواه جيد من الاحماض الامينية إلا أنه قليل المحتوى من الاحماض الأمينية الحاوية على الكبريت، ويجب الأخذ بنظر الاعتبار إمكانية إنتاج السموم الداخلية endotoxins من قبل بعض انواع البكتريا الموجبة لصبغة كرام.

3- الخمـــــائر Yeasts

تطورت عملية انتاج الخمائر على نطاق تجاري على مدى اكثر من قرن خاصة الأنواع التابعة لأجناس *Saccharomyces , Candida , Torulopsis*. تعد معدلات نمو الخمائر عالية بالرغم من كونها ابطأ من بعض انواع البكتريا السريعة النمو،وعند تنمية الخمائر يتم ضبط pH الى3.5-5 مما يقلل خطر التلوث البكتيري ويمكن فصل خلايا الخميرة الناتجة بسهولة من وسط النمو باستعمال الطرد المركزي. تتراوح كمية البروتين في الخمائر **55 - 60 %** ويحتوي **15%**

احماض نووية (على اساس الوزن الجاف). لذا يجب معاملة الخميرة الناتجة لتقليل محتواها من هذه الاحماض، وتمتاز الخمائر بمحتوى جيد من الاحماض الامينية بالرغم من نقص الاحماض الحاوية على الكبريت بشكل أكبر من البكتريا ويمكن تدعيمها بالميثايونين وتحتوي الخمائر على كمية عالية من مجموعة فيتامين B

4- الفطريات الخيطية (الأعفان) Filamentous fungi (moulds)

على الرغم من معدلات النمو للأعفان أقل من البكتريا و الخمائر عامة إلا إنه يمكن عزل عدد من الفطريات الدقيقة ذات معدلات نمو تقارب معدلات نمو الخمائر. وإن معدلات نمو الفطريات تختلف حسب الوسط الغذائي، حيث تنمو الفطريات بصورة جيدة عند pH تتراوح من 3 - 8 ويمكن ان تنمو عند pH أقل من 5 مما يقلل التلوث البكتيري. إلا أن هناك خطورة التلوث بالخمائر في حالة إهمال التعقيم عند التنمية. تنمو الاعفان في المزارع المغمورة بشكل خيطي filamentous أو بشكل كريات pellets أو بشكل نموات تشبه الخميرة وهذه الاشكال بعضها إيجابي وبعضها سلبي في إنتاج بروتين احادي الخلية وتكون عملية فصل الخلايا أكثر سهولة بواسطة الترشيح البسيط عندما تنمو على شكل خيوط أو كريات. تتراوح نسبة البروتين الخام في الأعفان 50-55% وتحتوي على نسبة عالية من الاحماض النووية خاصة RNA تصل الى 15% ويشكل الكايتين الذي هو من مكونات جدار الخلية نسبة كبيرة من النتروجين الكلي، ويمتاز البروتين بمحتوى جيد من الأحماض الأمينية إلا إنه ذو محتوى قليل من الأحماض الأمينية الحاوية على الكبريت. تنتج عدد من الأعفان مركبات سامة يطلق عليها mycotoxins لذا يجب اجراء الفحص الدقيق على السلالات المستعملة في تغذية الانسان والحيوان.

المواد الخاضعة المستعملة في انتاج بروتين احادي الخلية

تقسم مصادر الكاربون الكاربون المستعملة في إنتاج البروتين الأحادي الخلية الى :

1- مصادرالكاربون المتجددة Renewable

2- المصادر المتحجرة(البتروكيمياويات) وتستعمل في معظم مشاريع البحوث والتطوير

أما المصادر المتجددة فتكون على نوعين:

أ- الكاربوهيدرات ذات النوعية الجيدة وتستخدم في إنتاج الأعلاف والأغذية.

ب- المخلفات وتستخدم في انتاج البروتين الأحادي الخلية كوسيلة للسيطرة على تلوث البيئة.

المصادر المتحجرة(البتروكيمياويات)

وتشمل الألكانات الاعتيادية وزيت الغاز الحاوي على الألكانات والميثان والميثانول والايثانول.

أ-الهيدروكاربونات السائلة (الالكانات الطبيعية أوالاعتيادية n-alkanes)

هناك مركبات مماثلة للألكانات وذات عدد ذرات كاربون قليلة وسائلة عند درجة حرارة الغرفة من n-pentane الى n-octane تكون سامة إذ تعمل على إذابة أغلفة الخلية أو بروتين هذه الأغلفة لذا فإن الألكانات التي تستعمل كمادة خاضعة يتراوح عدد ذرات الكاربون من 9-18 ذرة وهذه تتراوح نسبتها في النفط 0 - 30% ويمكن استخلاصها بصورة إنتقائية من الكيروسين أو من زيت الغاز عند الحاجة. ويمكن استعمال زيت الغاز مباشرة كمادة خاضعة إلا إنه فقط 10%من زيت الغاز قابل للتخمر والباقي يجب استرجاعه من البروتين الأحادي الخلية ويعاد الى مصانع التكرير لمعاملته. كما إن من سلبيات هذه الطريقة إمكانية التلوث بالمركبات الأروماتية الحلقية التي تسبب السرطان. وتمتاز الألكانات الطبيعية بكونها غير ذائبة بالماء ويعد انتقالها الى الخلية ذا أهمية رئيسية. تنتشر الهيدروكاربونات في وسط التخمر بفضل التقليب agitation والتهوية مكونة مستحلباً خشناً

macro - emulsion ثم يتحول إلى مستحلب ناعم micro-emulsion بواسطة الفعالية الحيوية التي تقوم بها الخلايا. وقد وجد أن الميكروبات التي لها القابلية على استخدام الهيدروكاربونات تنتج عوامل فعالة على السطح surfactants تساعد على الاستحلاب ويعتقد أنها تساعد على انتشار جزيئات الهيدروكاربونات وعبورها خلال جدار الخلية. أما العناصر الاخرى غير الكاربون التي تحتاجها عملية انتاج البروتين الأحادي الخلية من الهيدروكاربونات فهي نفسها التي تستخدم مع الكاربوهيدات مثل الامونيا وحامض الفوسفوريك والبوتاسيوم والمغنسيوم والمنغنيز والخارصين والحديد. ومن العوامل التي تؤثر في النمو والانتاجية عند استخدام الهيدروكاربونات هي انتقال الأوكسجين وانتقال العناصر الغذائية الى الخلية وإنتاج الحرارة. بالرغم من ان الخلايا تحتاج إلى كميات أقل من الكاربون عند استخدامها للهيدروكاربونات في التنمية مقارنة بالكاربوهيدرات إلا أنها تحتاج الى كميات أكبر من الأوكسجين لعدم وجود الأوكسجين في تركيب تلك المواد على العكس من الكاربوهيدرات التي تحتوي على الأوكسجين.

ب- الهيدروكاربونات الغازيةُ

1- الميثان Methane

يعد من اكثر الهيدروكاربونات الغازية المستخدمة في الدراسات الخاصة بإنتاج بروتين احادي الخلية. ويشكل الميثان المادة الرئيسية في الغاز الطبيعي والذي يحرق عند آبار النفط في بعض مناطق العالم ويمتاز الميثان بـ:

أ- متوفر بنقاوة عالية.
ب- لا يترك مخلفات ويمكن إزالته بسهولة من وسط التخمر.
ت- يمكن الحصول على إنتاجية عالية وباستخدام الطريقة المستمرة.

إلا إن أهم المشاكل التي تواجه إنتاج البروتين الأحادي الخلية من الميثان هي ضرورة نقل غاز الأوكسجين والميثان فضلاً عن الخطورة الناجمة من استخدام مادة غازية سواء بشكل منفرد أو مجتمعة. إن الحاجة الكبيرة للأوكسجين يرافقها إنتاج حرارة عالية لذا يجب التبريد ومن المشاكل الاخرى هي تكوين مواد مثبطة في الوسط الغذائي وخطورة حصول انفجار إذا كانت نسبة الاوكسجين أكثر من 12% (حجم/حجم)، لذا ينبغي أن تكون هناك حاجة لرأس مال عالٍ لذا فإن عدد من المشاريع لا تتمكن من استخدام الميثان كمادة خاضعة لإنتاج البروتين.

ومن الأحياء المجهرية التي تتمكن من استخدام غاز الميثان كمصدر للكاربون في إنتاج الكتلة الحيوية هي *Methyococcus capsulatus* ، *Pseudomonas methanica* ، *Methanomonas methanica* و *Pseudomonas methanitrificans*

2 - الميثـــانـول Methanol

يمكن استخدام الميثان بصورة غير مباشرة في انتاج بروتين أحادي الخلية وذلك لتحويله الى الميثانول و تنمية البكتريا أو الخمائر عليه ويمكن تحضير الميثانول كيميائيا من الميثان وبذلك يمكن توفير كميات هائلة من الغاز الطبيعي أو بتحضيره من مصادر أخرى كالفحم الحجري و زيت الغاز و الخشب ومن إيجابيات استعماله هي ذوبانه الكامل بالماء وقلة المخاطر الناجمة عن الانفجار ووجود أنواع كثيرة من الأحياء المجهرية تستطيع النمو عليه *Methlomonas metharica* ، *Pseudomonas utilis* ، *Pseudomonas extorquens* و البكتريا الخيطية *Streptomyces.spp* و الخمائر *Candida* ، *Biodinii* ، *Hansenula polymorpha*

3- الايثـــانـــول Ethanol

يمكن الحصول على الايثانول من البترول وذلك بإضافة الماء بطريقة تحضيرية إلى الأثيلين ، ومميزات استعمال الايثانول في إنتاج البروتين الأحادي الخلية هي نفس مميزات الميثانول إضافة إلى تقبل المستهلك للإيثانول كمادة خام في انتاج المنتجات الغذائية وتستطيع أنواع عديدة من الأحياء المجهرية من استخدام الإيثانول .

مصادر الكاربون المتجددة

1- ثاني اوكسيد الكاربون CO_2

يختلف تأثير CO_2 عن مصادر الكاربون المختزلة بكونه يستعمل من قبل الأحياء المجهرية التي تنتج طاقة بصورة ذاتية كما هو الحال مع الكائنات التي تقوم بعملية التركيب الضوئي مثل الطحالب. يوجدCO_2 في الهواء الطبيعي بتركيز واطئ (0.03%) بحيث لا يكفي لسد حاجة الطحالب للقيام بعملية التركيب الضوئي لإنتاج البروتين، ويمكن الحصول على مصادر أخرى رخيصة مثل غاز الاحتراق الذي يحتوي CO_2 0.5-5% ومصدرآخر هو استعمال البحيرات القلوية التي تحتوي على تركيز عالٍ من كاربونات الصوديوم. يمتاز استعمال نظام البرك بعدة مميزات في تنمية الطحالب مقارنة بالزراعة التقليدية فهي أكثر كفاءة في استخدام أشعة الشمس حيث يمكن تنمية الطحالب على مدار السنة واستخدام العناصر الغذائية استخداماً مثالياً ويمكن استخدام أي نوع من الأراضي بغض النظر عن خصوبتها إلا أن هناك بعض السلبيات والتي تتضمنها الزراعة التقليدية مثل الاعتماد على الظروف الجوية ومنها ضوء الشمس واستخدام الارض إضافة إلى تعرضها للحيونات والحشرات والأدغال والأمراض.

ينمو طحلب سبايرولينا Spirulina بصورة جيدة في البحيرات القلوية يصل pH حتى إلى11 وهذا يمنع التلوث بالأحياء المجهرية وبذلك يمكن الحصول على مزارع نقية من هذا الطحلب.

2- المولاس

هو الوسط الغذائي التقليدي في إنتاج خميرة الخبز أو خميرة التوريولا *Candida utilis* . والمولاس هو عبارة عن الناتج العرضي في عملية إنتاج السكر من البنجر والقصب ويستعمل بكثرة كوسط في إنتاج الايثانول وتكون الخميرة الجافة ناتجاً ثانوياً في هذه الحالة. ويعد المولاس وسطاً ممتازاً لإنتاج البروتين الأحادي الخلية ولكن بسبب زيادة الطلب عليه في صناعات التخمير الأخرى فإنه يعد مصدراً غالياً لاستخدامه في إنتاج البروتين.

3-الشرش

هو السائل المتخلف من صناعة الجبن بعد إزالة الدهن والكازين من الحليب الكامل، والشرش المجفف يحتوي على 70% لاكتوز و9-14% بروتين و9 % رماد. وبسبب كون معظم الشرش يرمى فإنه يسبب مشاكل تلوث البيئة ويفضل من الناحية الاقتصادية فصل البروتين من الشرش ويباع كمادة مدعمة للأغذية وهذا يجعل محلول اللاكتوز أسهل تخمراً. يمكن فصل البروتين أما بالتسخين عند 95 مْ أو بالتحميض او بواسطة التبادل الأيوني أو الترشيح الفائق.

تعد الخمائر من الاحياء المجهرية الشائعة الاستعمال بوجود الشرش وخاصة خميرة *Fragilis* وهي *Kluyveromyces fragilis* وهذه إحدى طرق إنتاج البروتين الأحادي الخلية وتستخدم في فرنسا والطريقة الثانية تستعمل في ألمانيا حيث تستعمل مزرعة مختلطة من بكتريا *Lactobacillus bulgaricus* وخميرة *Candida krusei* أما الطريقة الثالثة فتستخدم في النمسا باستخدام سلالة سريعة النمو ومقاومة للحموضة من خميرة *Candida intermedia*

4- المواد الناتجة من تحلل السكريات المتعددة

يمكن تحلل السكريات المتعددة كالسيليوز والنشأ إلى سكريات أحادية وبصورة رئيسية الكلوكوز ثم تنمية أنواع عديدة من الأحياء المجهرية لإنتاج الكتلة الحيوية خاصة خميرة التوريولا *Candida utilis* . عادة تتحلل السكريات المتعددة بمعاملتها بالأنزيمات أو الحامض، حيث يتحلل السيليلوز بواسطة أنزيم السيليليز المنتج تجارياً من عفن *Trichoderma reesei* ويجب ان تعامل المخلفات السيليوزية ببعض المعاملات الكيميائية أو الفيزيائية أو الميكروبية وذلك لكي تتحرر مادة السيليوز وأشباه السيليلوز لتسهيل تحللها بواسطة الأنزيمات ولكن من الناحية العملية التحلل الكامل للسيليلوز يعد عملية مكلفة وذلك بسبب مقاومتها العالية للتحلل. وتعد معاملة المخلفات السيليلوزية بالقلويات خاصة هيدروكسيد الصوديوم من أقدم وأحسن طرق المعاملة القلوية حيث تعمل على ازالة اللكنين واشباه السيليلوز وزيادة المساحة السطحية وذلك عن طريق الانتفاخ وتحوير التركيب البلوري للسيليلوز. وقد وجد أن معاملة مخلفات قصب السكر (الباكاز) بواسطة هيدروكسيد الصوديوم أدى إلى زيادة تحلله بأنزيم السيلويلز من 21-50% ثم تزداد الى 76% عند معاملته بـ NaOH عند درجة حرارة 121 مْ وانخفضت نسبة اللكنين من 12-5 %.

ويعد استخدام النشأ وخاصة ذو النوعية العالية غير اقتصادي في إنتاج الكتلة الحيوية لكونه غالي الثمن إلا إن إحدى الشركات البريطانية قامت باستخدام محلل النشأ (الكلوكوز) في إنتاج البروتين باستخدام سلالات معينة من عفن *Fusarium graminearum* . وإن السبب الرئيسي في استخدام هذا العفن هو تركيبه الخيطي الذي يسهل فصله إضافة إلى إمكانية تصنيع منتوج يشبه اللحم في قوامه يدعى البروتين الفطري mycoprotein. وبعد الإنتاج يتم خفض نسبة RNA من 10-1% (على اساس الوزن الجاف) وذلك بتعريضه إلى درجة حرارة 64 مْ لمدة 20 دقيقة لتنشيط أنزيمات Rnase الداخلي، ثم يتم فصل المايسليلوم باستخدام مرشح تحت تفريغ ثم تضاف مواد مطعمة وعلى هيئة لحم دجاج تحتوي على45 % بروتين. وقد تستعمل المواد النشوية غير المتحللة في إنتاج البروتين حيث يستعمل جريش ثمار الكازافا الذي يحتوي على 65-70% رطوبة و30- 35 % مواد صلبة ويلقح بسبورات عفن *Asp. niger* بعد إضافة محلول مغذي يحتوي على كبريتات الأمونيوم واليوريا والاملاح المعدنية. ويتم التخمر بطريقة تخمرات الحالة الصلبة وليس من الضروري الحفاظ على التعقيم خلال العملية ويحتوي المنتوج النهائي على حوالي 20 % بروتين على أساس الوزن الجاف بينما كان قبل التخمر2.5 %.

5-معاملة المخلفات وانتاج البروتين الأحادي الخلية

كما هو الحال في معاملة النشأ في مصانع البطاطا باستخدام *Endomycopsis fibuliger* وخميرة *Candida utili* حيث يعمل الأول على تحلل النشأ ويقوم الثاني باستخدام السكر الناتج. كذلك معاملة المخلفات الزراعية مثل القش ومخلفات قصب السكر ونشارة الخشب حيث تجرى معاملتها بالمواد الكيميائية أو بالحرارة ثم التخمر باستخدام *Chaetomium cellulolyticum* والحصول على منتوج يحتوي على 35 % بروتين. كما يستعمل السائل المكبرت المتخلف من صناعة الورق بشكل واسع في إنتاج البروتين وباستعمال خميرة التوريولا أو عفن *Paecilomyces variot* حيث يعامل السائل المكبرت قبل التخمر بالبخار وذلك لإزالة غاز ثاني أوكسيد الكبريت الذي يثبط نمو الكائن المجهري وتضبط pH إلى 4.5 . وأهم مزايا هذه الطريقة هي اختزال متطلب الأوكسجين الكيموحيوي إلى أكثر من 80 % وذلك لقابلية العفن على استخدام حامض الخليك الموجود في السائل المكبرت كذلك قابليته على استخدام السكريات الخماسية والسداسية الموجودة وبعد الانتهاء من التخمر يفصل المايسليوم بالترشيح ويكبس للتخلص من الماء وبذلك تقل كلفة التجفيف وتصل نسبة البروتين في المنتوج 52-57 % ويستخدم في العلف الحيواني.

القيمة الغذائية للبروتين احادي الخلية

تتحدد قيمة البروتين الأحادي الخلية المستعمل في تغذية الحيوان أو الانسان بالقيمة الغذائية له اذ تحتوي البكتريا على أعلى كمية من البروتين بينما الأعفان تحتوي على أقل كمية من البروتين أما الخمائر والطحالب فتحتوي على كمية متوسطة من البروتين. ولا يشكل محتوى الأحماض النووية في البروتين أية مشكلة عند استخدامه في تغذية الحيوان لكونه يستطيع تحويل حامض اليوريك الى مركب ذائب يفرز مع البول، بينما لا يمتلك الإنسان أنزيم يورات أوكسديز (يوريكيز). وان تناول مركبات اليورين تؤدي الى زيادة نسبة حامض اليوريك في البلازما مسببة الاصابة بداء النقرس. إن الحد المسموح بتناوله من الاحماض النووية هو 2غم في اليوم وهذا يسمح باستهلاك 10 غم من بروتين الخمائر أو البكتريا في اليوم الواحد. لذا يجب معاملة البروتين الأحادي الخلية لتقليل كمية الأحماض النووية بتعريضه إلى صدمة حرارية أو استخلاص الاحماض النووية في وسط قاعدي أو استخدام الطريقتين معاً. إن البروتين الأحادي الخلية تنقصه الأحماض الأمينية الكبريتية لذا يجب إضافتها إلى العليقة لعدم تمكن الحيوان من تخليقها مثل التدعيم بالميثايونين كما يجب تعديل كمية الأرجنين و اللايسين